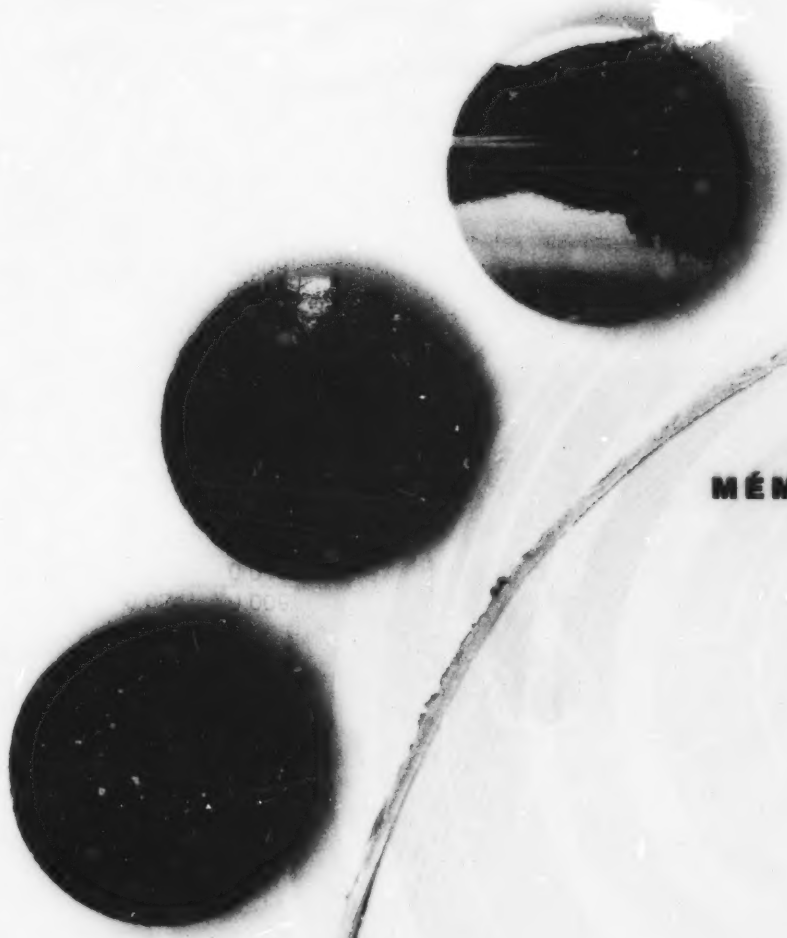
# L'ESTIMATION DU POTENTIEL DE CROISSANCE DES STATIONS FORESTIÈRES : EXEMPLE DU SOUS-DOMAINE DE LA SAPINIÈRE À BOULEAU JAUNE DE L'EST DU QUÉBEC



MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N°140

Par

Steve Bédard

Québec

102-03692/

# L'ESTIMATION DU POTENTIEL DE CROISSANCE DES STATIONS FORESTIÈRES : EXEMPLE DU SOUS-DOMAINE DE LA SAPINIÈRE À BOULEAU JAUNE DE L'EST DU QUÉBEC

2002

**MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N°140**

Par

**Steve Bédard, ing. f., M.Sc.**

**Direction de la recherche forestière**
**Forêt Québec**

## Mission de la DRF

## Les Mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité ad hoc formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou expérience. Ce document gratuit est tiré à 1 000 exemplaires. Il est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

**Ministère des Ressources naturelles**
Direction de la recherche forestière, Forêt Québec
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 3W8
Courriel : rech.for@mrn.gouv.qc.ca
Internet : www.mrn.gouv.qc.ca/drf

## Note biographique

Steve Bédard est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1992. En 1998, le même établissement lui décernait le diplôme de maîtrise ès sciences forestières. De 1992 à 1998, il a occupé successivement des postes de chargé de projet de recherche en écologie et dendrométrie à l'Université Laval (1992-1993), à l'Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue (1993-1995) et au Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (1995-1998). Au cours de cette période (1992-1998), les travaux de M. Bédard ont surtout porté sur l'intégration de l'information relative à l'écologie et la dendrométrie dans la planification de l'aménagement forestier. Depuis août 1998, M. Bédard est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière et ses travaux portent sur la sylviculture des forêts feuillues et mixtes. Il s'intéresse notamment aux effets de différents traitements sylvicoles sur la croissance, la régénération et la qualité des tiges dans les peuplements à dominance d'Érable à sucre et de Bouleau jaune.

# Remerciements

Ces travaux de recherche ont été rendus possibles grâce à la participation financière du ministère des Ressources naturelles du Québec et de l'aide technique des unités de gestion du Grand Portage et du Bas-Saint-Laurent du même Ministère. Je tiens à remercier les professeurs MM. Jean Bégin et Louis Bélanger de l'Université Laval ainsi que M. Jean-Pierre Saucier de la Direction des inventaires forestiers pour leurs judicieux conseils lors de la rédaction de ce manuscrit. Des remerciements particuliers s'adressent à M. Claude Lapointe qui a mis au point les programmes pour l'analyse statistique des données et à MM. Paul Dorais, Pierre Grondin, Jean-Yves Perron et Denis Thibault pour leurs collaborations. Je désire également exprimer ma reconnaissance aux équipes techniques : Mmes Lise Beauséjour et Geneviève Constantis, MM. Pierrot Boulay, Éric Daigle, Maurice Gagnon, Denis Hotte, Simon Moisan, Jean-Louis Morin, Jean Noël, Dany Pineau, Bernard Rousseau, Gino St-Pierre, Arnold van Gheulwe. Enfin, je tiens à remercier MM. Jean-Pierre Carpentier et Richard Zarnovican pour leurs conseils et MM. Pierre Bélanger et Jean-Bernard Fortin pour la révision et l'édition de ce document.

# Résumé

La modélisation de la croissance à l'aide de la relation hauteur-âge, stratifiée selon le type écologique, a été réalisée afin de déterminer le potentiel de croissance du Sapin baumier [*Abies* balsamea (L.) *Mill.*], de l'Épinette blanche [*Picea glauca* (Moench) Voss.] et des Épinettes noire et rouge [Picea mariana (Mill.) B.S.P., Picea rubens Sarg.]. Des comparaisons statistiques des courbes hauteur-âge entre les types écologiques ont permis de regrouper et de distinguer certains d'entre eux. Les résultats obtenus démontrent qu'il existe non seulement des différences de croissance entre les stations mais aussi entre les essences sur une même station. Malgré les différences observées entre les essences pour une même station, il a été possible de proposer cinq indices synthèses à partir des indices de qualité de station potentiels ($IQS_{pot}$) lesquels expriment la hauteur atteinte, à l'âge de 50 ans, sans contrainte de croissance. L'indice très élevé est associé aux stations des érablières à Bouleau jaune et des sapinières à Bouleau jaune, ayant des $IQS_{pot}$ respectifs de 19,2 et 19,8 m; l'indice moyen à élevé à la station mésique de la sapinière à Épinette rouge, ayant des $IQS_{pot}$ de 16,4 et 17,2 m; l'indice moyen aux stations xérique et hydrique des sapinières à Épinette rouge et à Thuya ayant des $IQS_{pot}$ de 14,8 et 16,4 m; l'indice faible à la station hydrique de la sapinière à Thuya ayant des $IQS_{pot}$ de 13,1 et 13,7 m et finalement l'indice très faible est associé à la station hydrique de la cédrière sur tourbe minérotrophe avec un $IQS_{pot}$ de 11,1 m.



# Abstract

*Growth modeling using the height-age relationship, stratified according to ecological type, was carried out in order to determine the growth potential of balsam fir [*Abies balsmea *(L.) Mill.], white spruce [*Picea glauca *(Moench) Voss.], black spruce [*P. mariana *(Mill.) B.S.P.] and red spruce [*P. rubens *Sarg.]. Statistical comparisons of height-age curves between the ecological types allowed us to aggregate and differentiate some of them. Results show that there are not only differences in growth among sites, but also among species on the same site. In spite of differences observed among species on the same site, it was possible to propose five integrated indices using potential site quality indices ($IQS_{pot}$), which express the height obtained at age 50 without any growth constraints. The very high index is associated with sugar maple/yellow birch and balsam fir/yellow birch sites, with $IQS_{pot}$ values of 19,2 and 19,8 m, respectively; a medium to high index on the balsam fir/red spruce mesic site, with $IQS_{pot}$ values of 16,4 and 17,2 m; a medium index on balsam fir/red spruce/northern white cedar xeric and hydric sites, with $IQS_{pot}$ values of 14,8 and 16,4 m; a marginal index on the balsam fir/northern white cedar hydric site, with $IQS_{pot}$ values of 13,1 and 13,7 m; and finally, a very low index is associated with hydric northern white cedar on a minerotrophic peat site, with a $IQS_{pot}$ value of 11,1 m.*

# Table des matières


PAGE

**Note biographique** ..... ii

**Remerciements** ..... iii

**Résumé** ..... v

***Abstract*** ..... v

**Liste des tableaux** ..... ix

**Liste des figures** ..... xi

**Introduction** ..... 1

**CHAPITRE PREMIER MATÉRIEL ET MÉTHODES** ..... 3

1.1 Localisation et description de la région étudiée ..... 3
1.2 Classification écologique ..... 3
1.3 Prises de données dendrométriques ..... 6
1.4 Traitement des données ..... 9
1.4.1 Correction de l'âge des tiges ..... 11
1.4.1.1 Période d'oppression ..... 11
1.4.1.2 Épidémie de la Tordeuse des bourgeons de l'Épinette ..... 13
1.4.2 Description du modèle ..... 13

**CHAPITRE DEUX RÉSULTATS ET DISCUSSION** ..... 17

2.1 Courbes spécifiques par type écologique ..... 17
2.2 Étude comparative des types écologiques ..... 20
2.2.1 Épinette blanche ..... 21
2.2.2 Épinettes noire et rouge ..... 23
2.2.3 Sapin baumier ..... 23
2.3 Comparaison des courbes obtenues avec les courbes de Ker et Bowling ..... 24
2.4 Synthèse des résultats ..... 24
2.5 Utilisations possibles des résultats ..... 24

Conclusion ..... 29

Références bibliographiques ..... 31

**ANNEXE A.**
Description des codes des dépôts de surface utilisés ..... 35

**ANNEXE B.**
Classes de drainage utilisées ..... 36

# Liste des tableaux


| | | PAGE |
|---|---|---|
| **Tableau 1** | Groupes écologiques d'espèces | 6 |
| **Tableau 2** | Caractéristiques dendrométriques marchandes des placettes échantillons | 8 |
| **Tableau 3** | Nombre de tiges selon l'essence et le type écologique | 9 |
| **Tableau 4** | Statistiques descriptives de la hauteur à la fin de la période d'oppression | 11 |
| **Tableau 5** | Statistiques descriptives des tiges retenues pour la modélisation | 15 |
| **Tableau 6** | $IQS_{pot}$ et coefficients de régression selon le type écologique | 18 |
| **Tableau 7** | Seuils observés des comparaisons des courbes hauteur-âge selon le type écologique | 20 |
| **Tableau 8** | $IQS_{pot}$ et coefficients des courbes hauteur-âge selon le groupe de types écologiques | 21 |
| **Tableau 9** | Synthèse des résultats | 26 |

# Liste des figures


PAGE

**Figure 1** Localisation du territoire d'étude et des placettes-échantillons .... 4

**Figure 2** Toposéquence et principales caractéristiques des types écologiques ..... 7

**Figure 3** Accroissements moyens annuels en hauteur des espèces pour la période 1895 à 1995 ..... 10

**Figure 4** Exemple de la correction des courbes hauteur-âge de six Sapins baumiers d'une même placette ..... 12

**Figure 5** Exemple de l'ajustement de la relation hauteur-âge pour corriger l'effet de la Tordeuse des bourgeons de l'Épinette sur une tige de Sapin baumier ..... 14

**Figure 6** Courbes hauteur-âge selon le type écologique ..... 19

**Figure 7** Courbes hauteur-âge synthèses et indice de qualité de station potentiel ..... 22

**Figure 8** Comparaison des courbes hauteur-âge synthèses à celles de Ker et Bowling (1991) ..... 25

# Introduction

Le domaine bioclimatique de la sapinière à Bouleau jaune de l'Est couvre une superficie de 40 865 km$^2$ dans les régions du Bas-Saint-Laurent, de la ceinture du massif de la Gaspésie, de la vallée du Saguenay et de la cuvette du Lac-Saint-Jean (Saucier *et al.* 1998). Les peuplements forestiers de cette zone de la forêt boréale mixte constituent une importante source de matière ligneuse pour l'industrie forestière. Malgré qu'ils soient parmi les plus productifs au Québec (MRNQ 1994), les connaissances concernant la structure, la composition et le dynamisme de ces écosystèmes sont limitées (Conseil de la recherche forestière du Québec 1995). Ces forêts ont été perturbées à maintes reprises par la Tordeuse des bourgeons de l'Épinette [*Choristoneura fumiferana* (Clem.)], (Blais et Martineau 1960, Blais 1983, Lachance *et al.* 1990), et les activités de récolte forestière ont été importantes et souvent accélérées par les coupes de récupération des aires dévastées par cet insecte. Comme dans plusieurs autres régions forestières canadiennes, on a entrepris depuis quelques années un virage forestier important, en passant d'une foresterie de récolte de la forêt vierge à une foresterie plus intensive axée sur la production d'une nouvelle matière ligneuse (Bélanger *et al.* 1995). Dans ce contexte, un des besoins fondamentaux de l'aménagiste réside dans l'identification des stations forestières en regard de leur potentiel de production. Cette connaissance de la forêt permettra : 1) une identification des stations forestières méritant une sylviculture plus intensive; 2) un meilleur choix des objectifs d'aménagement et des essences que l'on veut favoriser dans les peuplements; et 3) l'établissement d'un cadre nécessaire à l'élaboration de tables de production.

Pour connaître le potentiel de croissance d'une station forestière, l'indice de qualité de station (IQS) est la mesure dendrométrique la plus utilisée (Carmean 1975, Spurr et Barnes 1980). Cet indice est déterminé à partir de la hauteur dominante atteinte à un âge de référence, généralement de 50 ans pour les essences résineuses de l'est de l'Amérique du Nord (Carmean et Lenthall 1989). Dans des conditions optimales de croissance, la hauteur des arbres dominants d'un peuplement est un bon indicateur du potentiel de croissance d'une espèce sur une station donnée. En effet, cette variable est fortement corrélée au volume et faiblement corrélée à la densité des peuplements (Davis et Johnson 1987). Cependant, dans le cas des espèces résineuses d'ombre que l'on retrouve dans les sapinières, l'utilisation de l'IQS pose certains problèmes. Tout d'abord, par leur capacité à se régénérer sous-couvert et à supporter la compétition pendant plusieurs années, les espèces tolérantes subissent un retard de croissance (oppression) qui peut s'échelonner sur plusieurs décennies (Morris 1948, Assman 1970, Zarnovican 1981, Burns et Honkala 1990). Cette variabilité de l'âge des tiges causée par l'oppression rend difficile la schématisation du potentiel de croissance à l'aide de la relation hauteur-âge. D'autres facteurs tels que la défoliation causée par les épidémies d'insectes, comme la Tordeuse des bourgeons de l'Épinette (TBÉ), influencent également la croissance en hauteur des principales essences résineuses des sapinières (MacLean 1985). Cette perturbation modifie de façon significative la relation hauteur-âge et accentue la difficulté de définir des IQS (Monserud 1987, Saucier 1993).

D'autres méthodes telles l'utilisation d'indices mixtes lesquels utilisent à la fois des indices écologiques et dendrométriques méritent d'être expérimentées (Decourt 1973). Cet auteur indique que ce type d'indice reliant la mesure de la hauteur dominante à des variables écologiques combine les avantages des autres types d'indices (climatiques, floristiques, écologiques, dendrométriques) et en évite les inconvénients. La relation hauteur-âge liée à des variables de station a d'ailleurs été utilisée à maintes reprises dans des travaux relatifs à la productivité forestière des sapinières dans l'est de l'Amérique du Nord. Rappelons les travaux de Page (1976) à Terre-Neuve, Zelazny *et al.* (1989) au Nouveau-Brunswick, Linteau (1955), Lafond (1969), Zarnovican (1983), Saucier (1992, 1993), Grondin *et al.* (1993), Bélanger *et al.* (1995) et Tremblay (1996) au Québec. Bien que la plupart de ces études aient démontré l'utilité de la classification écologique pour prédire la croissance des sapinières, certains éléments méritent d'être précisés notamment l'utilisation de la relation hauteur-âge

comme indice de productivité. Des analyses de croissance plus élaborées, afin de mieux définir le potentiel de croissance des stations, sont souhaitables (ZARNOVICAN 1981, 1983; SAUCIER 1992, 1993; GRONDIN *et al.* 1993).

Ce projet a pour objectif principal de concevoir une méthode pour estimer et comparer le potentiel de croissance en hauteur en fonction de l'âge des stations en faisant appel à la stratification des données selon la classification écologique réalisée par GRONDIN *et al.* (1995) pour le sous-domaine de la sapinière à Bouleau jaune de l'Est. Pour atteindre cet objectif, les trois étapes suivantes seront réalisées : 1) estimer le potentiel de croissance du Sapin baumier [*Abies balsamea (L.) Mill.*], de l'Épinette blanche [*Picea glauca (Moench) Voss.*] et des Épinettes noire et rouge [*Picea mariana (Mill.) B.S.P., Picea Rubens Sarg.*]; 2) de comparer le potentiel de croissance de ces essences pour les principaux types écologiques à l'aide de tests statistiques; et 3) s'il y a lieu, de proposer des regroupements de types écologiques de croissance apparentée pour définir des stations forestières.

# Chapitre premier

# Matériel et méthodes

## 1.1 Localisation et description de la région étudiée

Le territoire d'étude (Figure 1) s'étend d'ouest en est de Montmagny jusqu'à Matane et borde les frontières du Maine et du Nouveau-Brunswick. Selon THIBAULT (1985), ce territoire est compris principalement dans le domaine bioclimatique de la sapinière à Bouleau jaune, dans les régions écologiques 5a-Basses et moyennes Appalaches et 5c-Lac Matapédia. Une petite portion du territoire fait partie du domaine de l'érablière à Bouleau jaune, soit la région écologique 4a-Collines de Mégantic, lacs Etchemin et Squatec. Toutefois, l'ensemble du territoire forestier est caractérisé par la dominance du Sapin baumier, tandis que le Bouleau jaune occupe la seconde place. L'érablière à Bouleau jaune couvre surtout les secteurs des basses altitudes ou des basses latitudes, et on la retrouve principalement aux endroits suivants : 1) le long du littoral de Rivière-du-Loup et de Rimouski; 2) dans la région du Témiscouata (Cabano et Dégelis); et 3) à l'extrême ouest du territoire dans la région de Montmagny. Selon SAUCIER et GRONDIN (1996), la majeure partie du territoire d'étude fait partie du sous-domaine de la sapinière à Bouleau jaune de l'Est.

Au point de vue climatique, la température annuelle moyenne se situe autour de 2,5 °C et les précipitations totales annuelles varient entre 900 et 1 100 mm (SAUCIER et ROBITAILLE 1995). La saison de croissance s'échelonne généralement sur 160 à 170 jours. Au plan physiographique, le relief s'accentue de la côte vers l'intérieur des terres et se compose essentiellement de coteaux et de collines. L'altitude maximale excède rarement 600 mètres. Le substratum rocheux est sédimentaire et principalement composé de shale, de grès, de calcaire et de conglomérat. Les dépôts de surface sont surtout d'origine glaciaire et le till[1] domine le territoire. Les tills minces et épais se retrouvent en proportion semblable et recouvrent la plupart des coteaux et des collines. Des dépôts d'altérations de la roche en place occupent également la partie nord-est du territoire.

Le paysage forestier de la région a passablement été modifié par l'homme à la suite de plus d'un siècle d'activités forestières. On trouve actuellement des traces de récoltes pratiquement sur l'ensemble du territoire. Les épidémies de Tordeuse des bourgeons de l'Épinette (TBÉ) et les feux de forêt ont également contribué, de façon significative, à la modification du couvert végétal. Les premières épidémies de Tordeuse connues ont eu lieu vers 1806, 1878 et 1912 (BLAIS 1961). Plus récemment, deux autres épidémies ont été recensées, la première de 1950 à 1958 (BLAIS 1961 et LACHANCE *et al.* 1990) et la plus récente de 1973 à 1991 (LACHANCE *et al.* 1990; BORDELEAU *et al.* 1989, 1990, 1991 et BORDELEAU 1992). Les peuplements atteints par la TBÉ ont fait l'objet d'importantes coupes de récupération au cours des années 1980. Les feux ont également perturbé d'importantes superficies de forêt au début du siècle, principalement en 1923 (LORTIE 1979), mais ces derniers sont peu documentés. Ces étendues perturbées par le feu sont aujourd'hui couvertes de tremblaies ou de tremblaies résineuses (GRONDIN *et al.* 1995b).

## 1.2 Classification écologique

La classification écologique utilisée provient d'une étude effectuée dans l'ensemble du sous-domaine de la sapinière à Bouleau jaune de l'Est (GRONDIN *et al.* 1995a, 1995b). Cette étude repose sur 2 234 points d'observations écologiques réalisés selon la norme établie par le ministère des Ressources naturelles du Québec (SAUCIER *et al.* 1995). L'analyse des données porte essentiellement sur les éléments suivants :

- la détermination de groupes écologiques d'espèces[2] indicatrices;
- le regroupement de groupes écologiques d'espèces;

1. Le terme **till** est utilisé pour décrire le matériau des moraines de fond ou d'ablation laissées par le passage des glaciers continentaux. Il est déposé directement par la glace sans qu'il y ait eu intervention des eaux de fonte (ROBITAILLE et ALLARD 1996).

2. ***Le groupe écologique d'espèces indicatrices*** est l'unité de classification qui sert à décrire le sous-bois. Il est formé d'un assemblage de groupes écologiques élémentaires lesquels renseignent sur la qualité d'un lieu donné ainsi que sur les perturbations ou l'évolution de la végétation (MRNQ 1996).

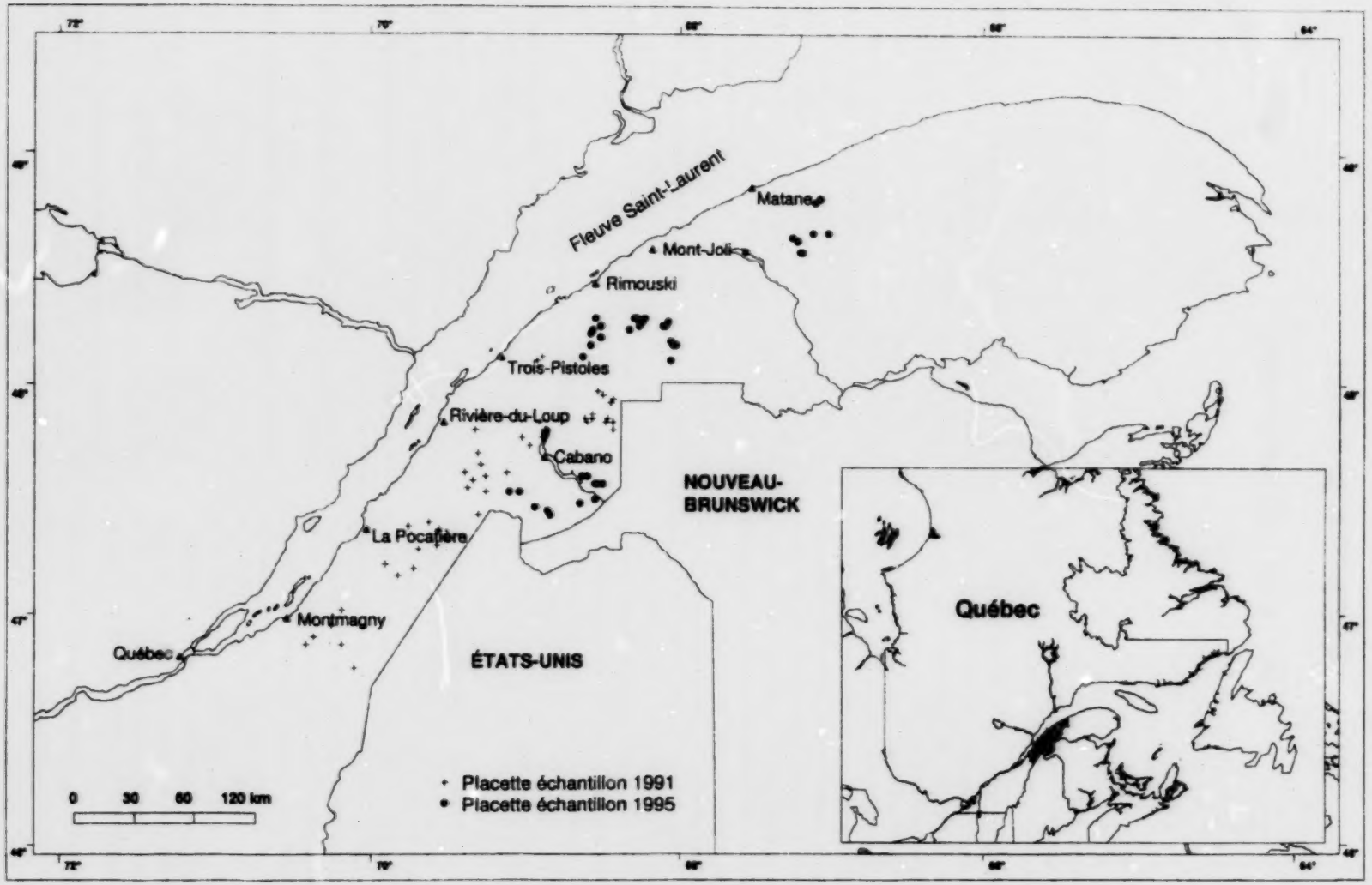



**Figure 1**

Localisation du territoire d'étude et des placettes-échantillons.

- l'établissement de liens entre les regroupements de groupes écologiques d'espèces et les espèces arborescentes dans le but de définir des végétations potentielles[3];
- l'établissement de liens entre les regroupements de groupes écologiques d'espèces, les caractéristiques de station qui leur sont associées et la végétation potentielle afin de définir des types écologiques[4].

Ces quatre étapes s'effectuent principalement en étudiant les tableaux de végétation élaborés à l'aide d'analyses de correspondance effectuées par le logiciel *Twinspan* (HILLS 1979). Ce logiciel permet la création de tableaux de végétation dans lesquels sont regroupés les relevés possédant le plus d'affinités floristiques. Cette méthode s'inspire des travaux de BLOUIN et GRANDTNER (1971), GERARDIN (1977, 1980), BERGERON (1980) et BÉLANGER (1985).

La classification écologique du territoire repose sur huit groupes d'espèces indicatrices (GRONDIN *et al.* 1995b). Le tableau 1 présente les espèces indicatrices pour les groupes retenus. À chacun des groupes, sont associées des caractéristiques particulières de station (drainage, régime nutritif), de composition forestière (essence, densité, hauteur) et d'historique des perturbations. Les stations à drainage xérique et mésique sur tills d'épaisseur variable et situées généralement en haut de pente sont colonisées par la végétation potentielle de l'érablière à Bouleau jaune et de l'érablière à Hêtre. Ces stations sont caractérisées par le groupe de l'Érable de Pennsylvanie (ERP). À mi-pente, la station de la sapinière à Bouleau jaune mésique sur tills épais est dominée par le groupe de l'Érable à épis (ERE). Le groupe ERE est également associé à la sapinière à Bouleau jaune xérique sur dépôts minces et à la sapinière à Bouleau blanc sur tills d'épaisseur variable laquelle se retrouve à des altitudes supérieures à 600 mètres. Ces deux dernières stations ne sont cependant pas fréquentes sur le territoire. En bas de pente, la sapinière à Bouleau jaune subhydrique sur tills épais est caractérisée par la présence des subhygrophytes et par un drainage latéral. Elle est associée au groupe ERE auquel s'ajoute le groupe de la Ronce pubescente (RUP). Plus bas sur la pente ou encore dans les dépressions ouvertes, on trouve la sapinière à Thuya sur tills épais et mal drainés. Cette station est associée aux groupes ERE et RUP auxquels s'ajoute le groupe de l'Aulne rugueux (AUR) qui indique un mauvais drainage et la présence de drainage latéral. Dans les dépressions ouvertes, on retrouve la cédrière à Sapin sur tourbe minérotrophe très mal drainée avec présence de drainage latéral. Cette station est associée au même groupe que la sapinière à Thuya mais s'y distingue par un dépôt organique. Sur les terrains plats à légèrement ondulés, les sapinières à Épinette rouge mésique et hydrique sur tills pierreux ou sur dépôts sablonneux dominent. Elles sont caractérisées par le groupe des Éricacées (VAA). Les sapinières à Épinette rouge ou à Thuya situées sur les crêtes rocheuses et dépôts minces se caractérisent également par le groupe à Éricacées (VAA). Dans les dépressions fermées où l'eau est stagnante, la pessière noire sur tourbe ombrotrophe est associée au groupe des Sphaignes (SPS) indicateur d'un très mauvais drainage. Cette station occupe de faibles superficies sur le territoire. Il faut noter qu'à tous ces groupes d'espèces indicatrices peuvent s'associer, sur certaines stations, les groupes d'espèces de lumière (PTA) ou d'ombre (PLS). Le groupe des espèces de lumière indique essentiellement une faible densité des strates arborescentes résineuses ou encore un couvert fermé à dominance de feuillus. En ce qui concerne le groupe des espèces d'ombre, il est fréquemment associé aux couverts résineux denses.

Les caractéristiques de station associées aux groupes écologiques et à la végétation potentielle ont permis de définir 15 types écologiques, reconnus comme des unités synthèses de classification. De par leur récurrence dans le paysage, les types écologiques peuvent être présentés sous forme de toposéquence. La figure 2 présente la toposéquence observée pour le sous-domaine de la sapinière à Bouleau jaune de l'Est. On y trouve la description des types écologiques à l'aide de la végétation potentielle, du milieu physique (dépôt de surface et classe de drainage) et des groupes écologiques. La codification du type écologique est celle utilisée par GRONDIN *et al.* (1995b). La première lettre du code indique le type de couvert forestier, la deuxième lettre, l'essence arborescente dominante de la végétation potentielle, tandis que les deux chiffres qui suivent sont un numéro séquentiel attribué à la végétation potentielle. Par exemple, FE31 indique une végétation potentielle feuillue (F) avec l'Érable à sucre comme essence dominante (E) et le numéro 31 permet de préciser le type écologique de l'érablière à Bouleau jaune et Hêtre sur dépôts généralement minces avec drainage plutôt rapide. Cette codification distingue ce type écologique de celui de l'érablière à Bouleau jaune (FE32) sur des dépôts plus épais avec drainage

3. ***La végétation potentielle*** est l'unité de classification qui synthétise les caractéristiques dynamiques de la végétation d'un lieu donné (MRNQ 1996).

4. ***Le type écologique*** est une unité synthèse de classification qui exprime à la fois les caractéristiques physiques du milieu et les caractéristiques écologiques de la végétation (composition, structure et dynamisme). Le type écologique décrit un lieu donné au moyen d'une combinaison du type de milieu physique et de la végétation potentielle (MRNQ 1996).

**Tableau 1**

Groupes écologiques d'espèces

| Nom du groupe[a] | Groupe ERP | Groupe ERE | Groupe RUP | Groupe AUR | Groupe VAA | Groupe PLS | Groupe SPS | Groupe PTA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Description** | Les espèces des érablières | Les espèces mésiques des sapinières à Bouleau jaune | Les espèces subhydriques | Les espèces hydriques des sapinières à Thuya et des cédrières | Les espèces des sapinières à Épinette rouge | Les sciaphytes (espèces d'ombre) | Les espèces hydriques des pessières noires | Les héliophytes (espèces de lumière) |
| **Espèces composant le groupe écologique** (de la plus abondante à la moins abondante) | *Acer pensylvanicum*<br>*Acer saccharum*<br>*Fagus grandifolia*<br>*Trillium erectum* | *Acer spicatum*<br>*Dryopteris spinulosa*<br>*Oxalis montana*<br>*Rubus idaeus*<br>*Picea glauca*<br>*Betula lutea*<br>*Lonicera canadensis* | *Rubus pubescens*<br>*Thuya occidentalis*<br>*Dryopteris disjuncta*<br>*Athyrium filix-femina*<br>*Galium spp.*<br>*Fraxinus nigra*<br>*Populus balsamifera*<br>*Ribes lacustre*<br>*Osmunda spp.* | *Alnus rugosa*<br>*Mnium spp.*<br>*Mitella nuda*<br>*Cornus stolonifera*<br>*Rhytidiadelphus triquetrus*<br>*Equisetum spp*<br>*Thalictrum spp.*<br>*Circaea alpina*<br>*Petasites palmatus* | *Vaccinium spp.*<br>*Kalmia angustifolia*<br>*Picea mariana*<br>*Ledum groenlandicum*<br>*Chamaedaphne calyculata*<br>*Viburnum cassinoides*<br>*Cladina spp.*<br>*Alnus crispa*<br>*Epigaea repens*<br>*Chimaphila umbellata* | *Pleurozium schreberi*<br>*Hylocomium splendens*<br>*Dicranum spp.* | *Sphagnum spp.* | *Pteridium aquilinum*<br>*Aster macrophyllus*<br>*Diervilla lonicera*<br>*Pleurozium schreberi* |

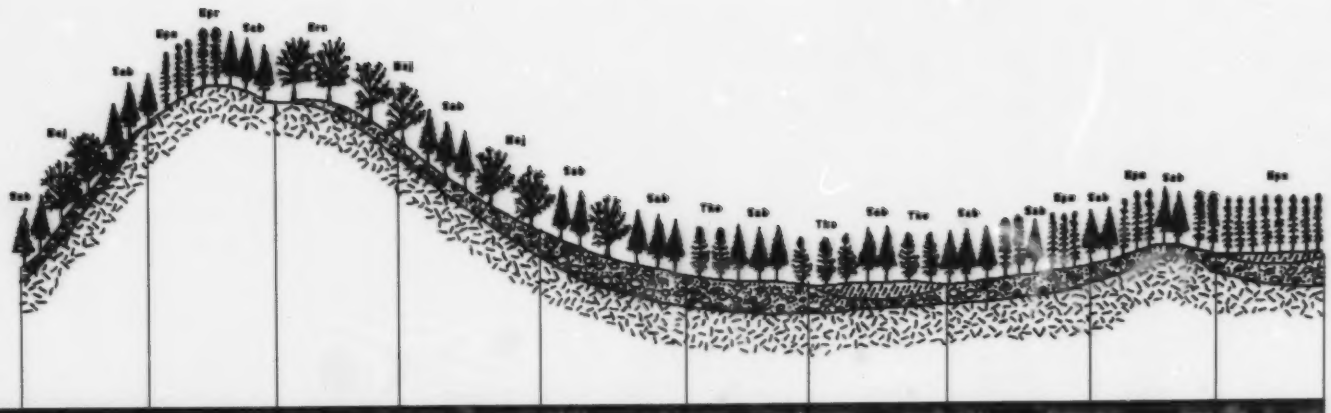
[a] Les groupes écologiques d'espèces sont nommés d'après l'espèce la plus abondante du groupe. Ils sont identifiés selon le code de l'espèce défini par SAUCIER *et al.* (1994). ERP : *Acer pensylvanicum*; ERE : *Acer spicatum*; RUP : *Rubus pubescens*; AUR : *Alnus rugosa*; VAA : *Vaccinium spp.*; PLS : *Pleurozium schreberi*; SPS : *Sphagnum spp*; PTA : *Pteridium aquilinum*.

modéré. Généralement, les deux derniers chiffres du code sont plus élevés avec l'augmentation de l'humidité des stations. À propos des types de dépôts et de leurs codes afférents, une description détaillée apparaît dans ROBITAILLE (1988) et une description sommaire des codes est présentée à l'annexe A. La classe de drainage est celle qui a été définie par BATES *et al.* (1985) et adaptée par SAUCIER *et al.* (1988) pour le programme de connaissance des écosystèmes forestiers au Québec. Elle varie de 0 à 6 et une brève description de chaque classe figure à l'annexe B. Le pH de l'humus a été déterminé à partir de 90 échantillons prélevés à raison de trois échantillons par placette dans les principaux types écologiques échantillonnés. Cette variable permet de qualifier le régime nutritif des types écologiques. Une description plus détaillée des types écologiques du sous-domaine de la sapinière à Bouleau jaune de l'Est figure dans GRONDIN *et al.* (1995b).

### 1.3 Prises de données dendrométriques

Au total, 88 placettes circulaires de 11,28 m de rayon (1/25 ha) ont été établies en 1991 et en 1995 dans des peuplements représentatifs des principaux types écologiques du territoire d'étude. Les peuplements étaient jugés représentatifs s'ils occupaient une partie homogène eu égard au milieu physique (type de dépôt et classe de drainage) et s'ils reflétaient bien la végétation potentielle de chacun des types écologiques étudiés. Les peuplements choisis devaient être âgés d'au moins 50 ans, avoir une densité du couvert supérieure à 40 %, une hauteur supérieure à 7 m et sans défoliation apparente.

Dans chaque placette, toutes les tiges vivantes d'un diamètre de 9,1 cm et plus à 1,30 m au-dessus du niveau le plus haut du sol ont été identifiées et dénombrées par classe de 2 cm. Le type de peuplement, les classes de densité, de hauteur et d'âge, les perturbations, l'exposition et le pourcentage de pente ont été notés. Les variables physiques du milieu (type de dépôt et son épaisseur, classe de drainage) et le type écologique ont été consignés. Trois échantillons d'humus ont également été prélevés dans 30 placettes établies en 1995 pour une analyse du pH. Le tableau 2 présente les caractéristiques dendrométriques



| écologique[a] | (RS12) | (RS11) | (FE31) | (MS22) | | | | | (RS11) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nom du type écologique (végétation potentielle) | Sapinière à Bouleau jaune xérique | Sapinière à Épinette rouge (thuya) xérique | Érablière à Bouleau jaune mésique | Sapinière à Bouleau jaune mésique | Sapinière à Bouleau jaune subhydrique | Sapinière à Thuya hydrique | Cédrière à Sapin sur tourbe minérotrophe | Sapinière à Épinette rouge hydrique | Sapinière à Épinette rouge ou noire mésique | Pessière noire sur tourbe ombro-trophe |
| Dépôt (code)[b] | Minéral mince ou roc (M1A, RIA, R) | Minéral mince ou roc (M1A, RIA, R) | Minéral épais (1A, 1AY) | Minéral épais (1A) | Minéral épais (1A) | Minéral épais (1A) | Organique (7T, 7E) | Minéral épais (1A) | Minéral épais (20, 30) | Organique (7T, 7E) |
| Drainage (classe)[c] | Xérique (10,20) | Xérique (10) | Mésique (20,30) | Mésique (20,30) | Hydrique (31,41) | Hydrique (41,51) | Hydrique (61) | Hydrique (40,50) | Mésique (20,30) | Hydrique (60) |
| Ph[d] | – | 3,4 | 3,8 | 3,7 | 5,0 | 5,4 | 6,1 | 2,9 | 2,9 | – |
| Principales Essences[e] | SAB-BOJ-ERR | SAB-THO-EPB | ERS-ERR-BOJ | SAB-BOJ-EPB | SAB-BOJ-FRN | SAB-THO | THO-SAB | SAB-EPX | SAB-EPX | EPN-SAB |
| Groupe écologique[f] | ERE | PLS-VAA | ERP | ERE | ERE-RUP | ERE-RUP | ERE-RUP-AUR | PLS-VAA-SPS | PLS-VAA | VAA-SPS |

[a] ( ) indique un type écologique rare possédant une répartition géographique particulière. [b] selon ROBITAILLE (1988). [c] selon SAUCIER *et al.* (1994). [d] moyennes à partir d'un total de 90 échantillons répartis dans l'ensemble des types écologiques. [e] BOJ : Bouleau jaune, EPB : Épinette blanche, EPX : Épinettes noire et rouge, ERR : Érable rouge, ERS : Érable à sucre, FRN : Frêne noire, SAB : Sapin baumier, THO : Thuya occidental. [f] voir tableau 1 pour description des groupes. – : données non disponibles.

**Figure 2**

Toposéquence et principales caractéristiques des types écologiques.

**Tableau 2**

Caractéristiques dendrométriques marchandes des placettes-échantillons

| Type écologique (code) | n[a] | Variable | Minimum | Maximum | Moyenne | Écart type |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Érablière à Bouleau jaune et Hêtre (FE31) | 1 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | – | – | 600 | – |
| | 1 | Surface terrière ($m^2$/ha) | – | – | 29,6 | – |
| | 1 | Volume ($m^3$/ha)[b] | – | – | 197,1 | – |
| Érablière à Bouleau jaune (FE32) | 8 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 475 | 1400 | 853 | 273,4 |
| | 8 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 23,8 | 43,9 | 30,7 | 5,9 |
| | 8 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 149,4 | 280,1 | 194,5 | 39,3 |
| Sapinière à Bouleau jaune mésique (MS12) | 18 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 475 | 1725 | 1111 | 388,6 |
| | 18 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 23,8 | 46,5 | 34,0 | 6,5 |
| | 18 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 149,2 | 277,7 | 206,3 | 38 |
| Sapinière à Bouleau jaune subhydrique (MS13) | 15 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 700 | 2050 | 1296 | 403,6 |
| | 15 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 31,0 | 49,3 | 39,5 | 5,5 |
| | 15 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 177,2 | 300,2 | 232,8 | 37,2 |
| Cédrière à Sapin (RC22) | 11 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 1175 | 1775 | 1391 | 205 |
| | 11 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 27,3 | 64,9 | 44,4 | 11,8 |
| | 11 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 129,9 | 320,1 | 216,9 | 71,6 |
| Sapinière à Thuya xérique (RS11) | 5 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 675 | 1550 | 1110 | 325,3 |
| | 5 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 25,9 | 41,4 | 34,6 | 7,2 |
| | 5 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 153,7 | 237,1 | 202,2 | 36,5 |
| Sapinière à Thuya hydrique (RS22) | 8 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 775 | 1700 | 1203 | 329,3 |
| | 8 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 19,9 | 51,8 | 37,1 | 9,7 |
| | 8 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 102,5 | 275,6 | 190,0 | 51,7 |
| Sapinière à Épinette rouge ou noire mésique (RS42) | 12 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 450 | 1775 | 1223 | 385,0 |
| | 12 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 23,8 | 37,9 | 30,2 | 5,0 |
| | 12 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 141,4 | 225,9 | 179,0 | 28,8 |
| Sapinière à Épinette rouge ou noire hydrique (RS43) | 10 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 900 | 2550 | 1430 | 495,8 |
| | 10 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 24,6 | 42,7 | 33,5 | 5,5 |
| | 10 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 127,2 | 235,2 | 192,1 | 31,3 |
| Total | 88 | Tiges ($n^{bre}$/ha) | 450 | 2550 | 1209 | 392,4 |
| | 88 | Surface terrière ($m^2$/ha) | 19,9 | 64,9 | 35,6 | 8,3 |
| | 88 | Volume ($m^3$/ha)[b] | 102,5 | 320,1 | 203,9 | 44,7 |

[a] nombre de placettes-échantillons, [b] volume marchand brut.

marchandes des placettes-échantillons tandis que les résultats relatifs au pH de l'humus sont présentés à la figure 2.

De trois à cinq arbres par essence, exempts de défauts apparents sur le tronc et la cime, ont été choisis dans chaque placette ou à proximité de celle-ci pour l'analyse de tige. Les arbres choisis devaient avoir leur diamètre à 1,30 m (DHP) le plus près du 95 per centile de la courbe cumulative du nombre de tiges de la placette. De cette façon, l'indice de station reflète la hauteur moyenne des 10 % des plus gros arbres de la placette (ZARNOVICAN 1983).

Les arbres sélectionnés ont été abattus et la longueur totale de chacun ainsi que la longueur et la largeur de leur cime vivante ont été mesurées. Des disques sur les tiges

abattues ont été prélevés systématiquement à 0,15, 0,40, 1,00 et 1,30 m de hauteur et par la suite à tous les mètres jusqu'à l'extrémité de la tige. Pour les tiges récoltées en 1995, le disque situé à 0,40 m a été remplacé par deux disques situés à 0,30 et à 0,60 m. De plus, pour les tiges de Sapin baumier et d'Épinette blanche, deux disques supplémentaires ont été prélevés dans la zone propice à la défoliation de la TBÉ. Ces disques étaient tronçonnés à la demie des deux billons de 1 m suivant les dix dernières années de croissance de l'arbre. Cette lecture de la croissance apicale a été réalisée en comptant les verticilles depuis la flèche terminale de la tige.

Les disques prélevés furent séchés puis poncés afin d'augmenter le contraste entre le bois initial et le bois final (cernes annuels). La lecture des cernes a été réalisée sur quatre rayons perpendiculaires pour les disques récoltés aux sections inférieures ou égales à 1,30 m ainsi que pour les disques de forme elliptique des sections supérieures. Les autres disques ont été mesurés sur deux rayons opposés. La lecture des cernes a été effectuée à l'aide d'un compas électronique conçu par ZARNOVICAN *et al.* (1992) pour les disques récoltés en 1991 et à l'aide du système automatique de mesure Windendro® pour les tiges récoltées en 1995. La croissance en hauteur a également été corrigée selon la procédure de CARMEAN (1972) qui, d'après DYER et BAILY (1987), est celle qui donne les meilleurs résultats. Cette correction est nécessaire puisque la section prélevée sur la tige se trouve habituellement à un point intermédiaire de la croissance annuelle et non à la fin de cette période. Elle est basée sur la théorie qu'en moyenne, la section prélevée se trouve au centre d'un accroissement annuel en hauteur. La mesure des accroissements a permis de reconstituer le développement en hauteur de 574 tiges à l'aide du programme de ZARNOVICAN *et al.* (1992) pour les données de 1991 et du programme Anatige (BÉGIN 1996) pour les données de 1995 (Tableau 3).

### 1.4 Traitement des données

Dans un premier temps, des graphiques présentant l'accroissement en hauteur observé sur les tiges récoltées ont été tracés pour chaque arbre. La technique de l'analyse de tiges utilisée permet de reconstituer la croissance apicale des arbres et par le fait même le développement temporel des tiges. Les graphiques obtenus ont démontré que certaines tiges ont eu un développement normal, tandis que d'autres ont subi des retards de croissance. Ces retards ont pour effet d'augmenter l'âge biologique de l'arbre par rapport à son stade de développement (ZARNOVICAN 1983). Ces périodes de faible croissance sont généralement attribuables à la compétition pour la lumière que subissent les espèces tolérantes lorsqu'elles ne forment pas le couvert dominant (BURNS et HONKALA 1990). D'autres facteurs externes tels que les épidémies de TBÉ peuvent également réduire significativement la croissance des essences étudiées (MACLEAN 1985, GAGNON 1985). La figure 3, qui présente les accroissements moyens annuels en hauteur des tiges récoltées en 1995, permet de constater les variations de la croissance des essences étudiées sur une période de 100 ans.

On remarque tout d'abord une période de faible accroissement qui peut s'échelonner sur plusieurs années. Cette période est probablement la conséquence de la compétition exercée par les strates supérieures. Par la suite, une augmentation graduelle et soutenue de la croissance en hauteur

**Tableau 3**

Nombre de tiges selon l'essence et le type écologique

| Essence | FE31 | FE32 | MS12 | MS13 | RC22 | RS11 | RS22 | RS42 | RS43 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sapin baumier | 9 | 23 | 77 | 53 | 10 | 25 | 25 | 18 | 24 | 264 |
| Épinette blanche | – | 7 | 28 | 34 | 9 | 8 | 19 | 7 | 5 | 117 |
| Épinettes noire et rouge | – | – | 5 | – | 41 | 11 | 9 | 38 | 27 | 131 |
| Thuya occidental | – | – | – | 13 | 24 | 3 | 22 | – | – | 62 |
| Total | 9 | 30 | 110 | 100 | 84 | 47 | 75 | 63 | 56 | 574 |

[a] FE31 : érablière à Bouleau jaune et Hêtre; FE32 : érablière à Bouleau jaune; MS12 : sapinière à Bouleau jaune mésique; MS13 : sapinière à Bouleau jaune subhydrique; RC22 : cédrière à Sapin; RS11 : sapinière à Thuya xérique; RS22 : sapinière à Thuya hydrique; RS42 : sapinière à Épinette rouge mésique; RS43 : sapinière à Épinette rouge hydrique.

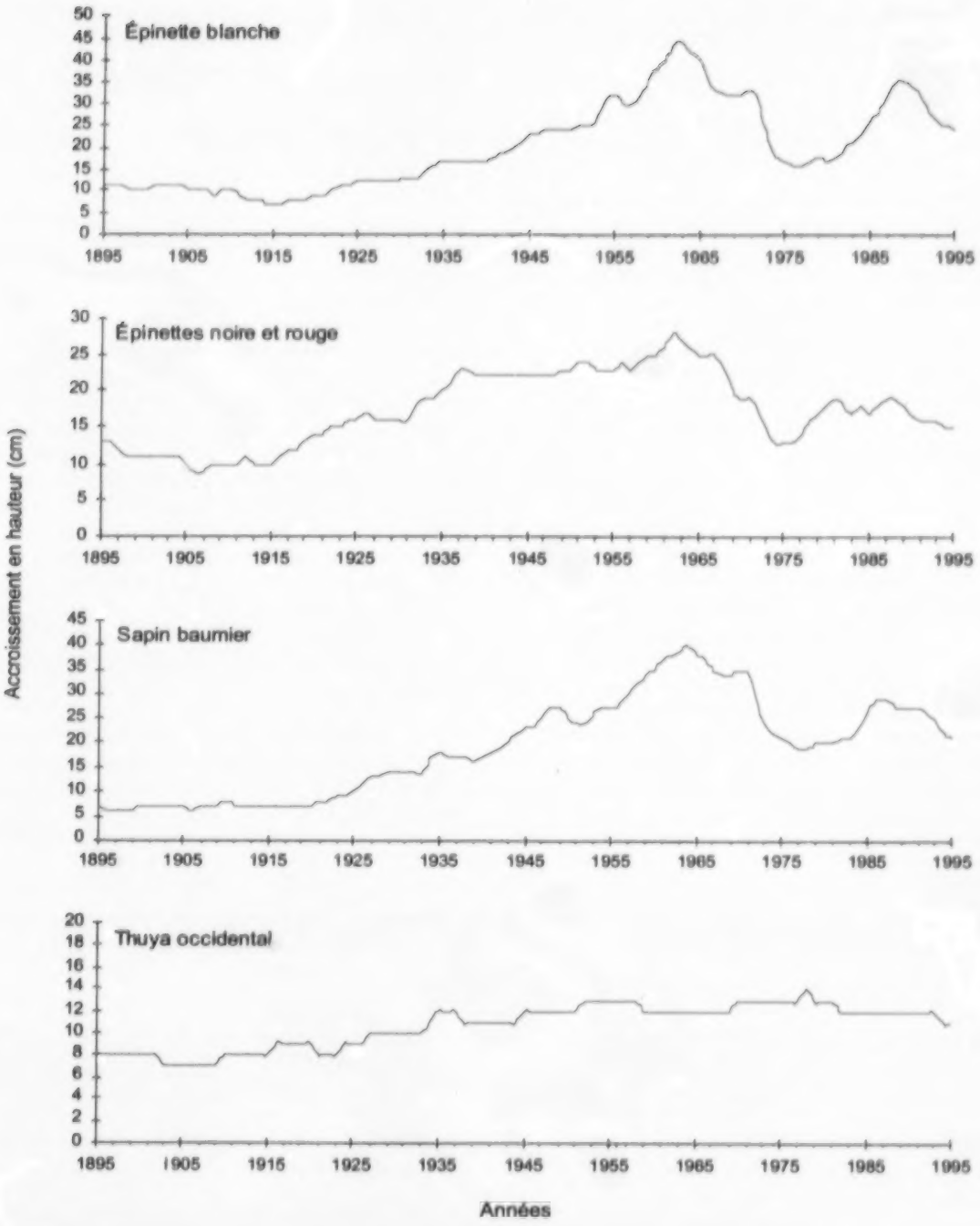



**Figure 3**

Accroissements moyens annuels en hauteur des espèces étudiées pour la période 1895 et 1995.

serait associée à la libération des tiges. La diminution importante et synchrone pour le Sapin et les Épinettes vers 1975 correspond au plus fort de l'épidémie de TBÉ dans cette région (Blais 1983, Lachance *et al.* 1990). Finalement, on observe une reprise graduelle de la croissance pour ces espèces hôtes de la TBÉ et un retour à la normale au milieu des années 1980. Les données recueillies sur 62 Thuyas (*Thuja occidentalis* L.) dans le même territoire permettent de vérifier que la baisse de croissance ne s'est pas produite durant cette période pour cette espèce non-hôte de la TBÉ. Ces observations permettent de vérifier l'hypothèse qu'il existe des diminutions importantes de croissance en hauteur attribuables à la compétition et aux épidémies de TBÉ. Ces pertes doivent être prises en compte lors de la modélisation puisqu'elles modifient significativement le patron de croissance en hauteur des tiges. Selon Carmean (1975), il est nécessaire d'écarter de l'analyse les périodes pendant lesquelles la croissance est conditionnée par des facteurs autres que ceux liés à la qualité de la station. Conséquemment, il est souhaitable d'évaluer la croissance que ces arbres auraient eu en l'absence des facteurs externes.

### 1.4.1 Correction de l'âge des tiges

#### 1.4.1.1 Périodes d'oppression

Afin d'exclure la période d'oppression, l'âge à 1,30 m de hauteur a été utilisé plutôt que l'âge à la souche comme le recommande plusieurs auteurs (Curtis 1964, Boudoux 1978, Griffin et Johnson 1980, Vicary *et al.* 1984, Smith et Carmean 1987, Carmean et Lenthall 1989, Ker et Bowling 1991). Bien que cette correction élimine la période d'oppression de plusieurs tiges, l'observation des graphiques de la relation hauteur-âge à 1,30 m démontre que 173 la subissaient toujours. Ces observations correspondent aux résultats de Zarnovican (1981) lesquels indiquent que la période d'oppression affecte les tiges au-delà de 1,30 m. Pour ces tiges, une évaluation de la fin de la période d'oppression a dû être réalisée à l'aide des graphiques illustrant les accroissements annuels en hauteur de chacune des tiges. Il a ainsi été possible d'évaluer la hauteur à la fin de la période d'oppression puisqu'une démarcation assez nette de l'accroissement en hauteur apparaît entre cette période et la période de libération des tiges. Le tableau 4 montre les statistiques descriptives de la hauteur à la fin de la période d'oppression pour les 173 tiges présentant de l'oppression au-delà de 1,30 m de hauteur.

La connaissance de la hauteur a la fin de la période d'oppression a permis de corriger l'âge des tiges opprimées. Cette correction a été réalisée en comparant le temps moyen qu'ont mis les arbres non opprimés à atteindre cette même hauteur (temps de passage). Cette correction, a été réalisée selon l'essence et le type écologique pour s'assurer que les tiges ont crû dans des conditions similaires. Une comparaison graphique de la relation hauteur-âge des tiges corrigées avec celles exemptes d'oppression a permis de confirmer que la correction n'entraîne pas une surestimation de la croissance. Cependant, certaines tiges n'ont pu être corrigées parce qu'elles ont été opprimées sur une période trop longue. Ce type de données n'étant pas souhaitable pour établir le potentiel de croissance des stations, elles ont donc été retranchées.

L'observation des graphiques de la relation hauteur-âge des tiges opprimées a également servi à démontrer qu'à la suite d'une période d'oppression, la croissance de la majorité des tiges s'effectue au même rythme que celles exemptes d'oppression. La figure 4 permet d'illustrer ces observations à partir de la relation hauteur-âge de six tiges de Sapin baumier récoltées dans la même placette. Ces

**Tableau 4**

Statistiques descriptives de la hauteur à la fin de la période d'oppression

| Essence | n[a] | Minimum | Maximum | Moyenne | Écart type |
|---|---|---|---|---|---|
| Épinette blanche | 38 | 2,10 | 7,38 | 3,26 | 1,21 |
| Épinettes noire et rouge | 51 | 2,13 | 6,05 | 2,82 | 0,86 |
| Sapin baumier | 84 | 2,10 | 5,37 | 2,88 | 0,78 |
| Toutes | 173 | 2,10 | 7,38 | 2,94 | 0,93 |

[a] nombre total de tiges.

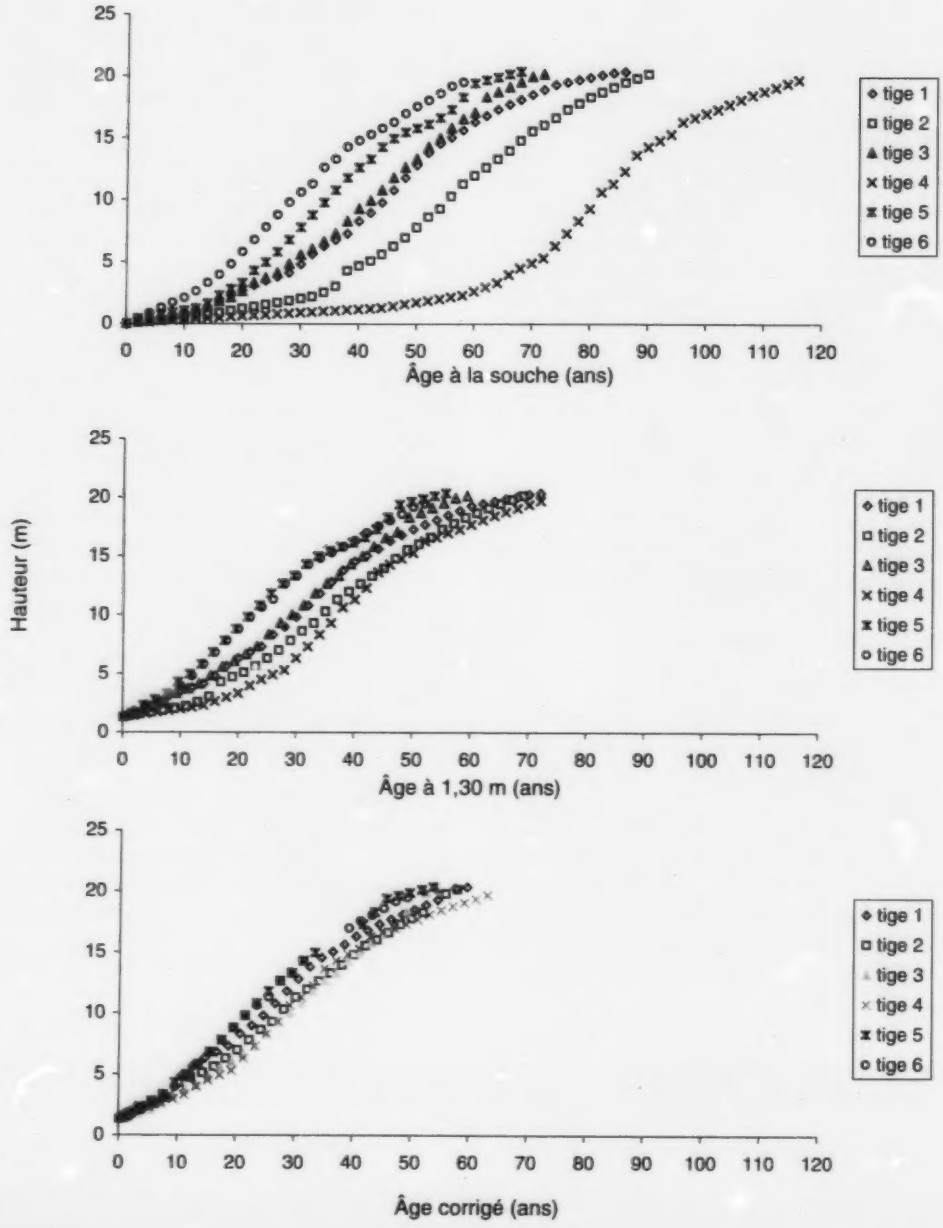



**Figure 4**

Exemple de la correction des courbes hauteur-âge de six Sapins baumiers d'une même placette.

observations confirment les résultats obtenus par MORRIS (1948), ZARNOVICAN (1983), GAGNON (1985) et RIOPEL (1998). L'effet de la correction est également illustré sur cette figure et permet de vérifier la validité de la méthode de correction de l'âge.

#### 1.4.1.2 Épidémies de la Tordeuse des bourgeons de l'Épinette

Comme il a été démontré précédemment, la dernière épidémie de la TBÉ a grandement perturbé la croissance apicale des essences étudiées (Figure 3). L'observation des graphiques de la croissance annuelle en hauteur pour chacune des tiges a permis de constater que la majorité d'entre elles avaient subi une réduction de croissance durant les périodes épidémiques documentées dans la littérature (BLAIS 1961; BLAIS et MARTINEAU 1963; BLAIS 1984; LACHANCE *et al.* 1990; BORDELEAU *et al.* 1989, 1990, 1991 et BORDELEAU 1992). Une évaluation de la durée de la réduction de croissance a été effectuée à partir de ces graphiques pour ainsi pouvoir prédire la croissance qu'aurait dû avoir chaque tige pendant la période épidémique. Pour être retenue comme période de réduction de croissance attribuable à la Tordeuse des bourgeons de l'Épinette, la période concernée devait avoir des accroissements annuels inférieurs à trois écarts types de la moyenne des accroissements de la tige. De plus, cette période devait se prolonger sur au moins cinq années consécutives et se situer dans les années d'épidémies reconnues. Cette procédure a permis d'identifier les périodes présentant une baisse notable de croissance en hauteur depuis le début de l'épidémie jusqu'à ce que la croissance corresponde à l'accroissement moyen prévalant avant la défoliation.

La correction des courbes hauteur-âge des tiges soumises à une réduction de croissance causée par les épidémies de la TBÉ a été réalisée en utilisant un modèle mathématique. L'équation de base (équation 1) est celle de Chapman-Richards (RICHARDS 1959) à laquelle on a ajouté des variables binaires (équation 2) selon la méthode de RIOPEL (1998). Les variables binaires introduites dans l'équation permettent de faire abstraction des données de croissance de la période épidémique proprement dite et d'ajuster la courbe en conséquence, après avoir défini une variable $Z_{1i}$ de valeur 1 si l'observation *i* survient après la période épidémique et de valeur 0 autrement :

$$[1] \quad Hauteur_i = 1{,}3 + b_1[1 - \exp(-b_2 \times \hat{a}ge)]^{b_3}$$

$$[2] \quad Hauteur_i = 1{,}3 + b_1[1 - \exp(-b_2 \times (\hat{a}ge_i + c_1 \times Z_{1i}))]^{b_3}$$

où $b_1$, $b_2$ et $b_3$ sont les coefficients de régression et exp est l'exponentiel de la base du logarithme népérien. Enfin, on utilise la valeur estimée de $c_1$, qui représente l'effet de retard sur l'âge de la tige produit par la période d'épidémie, afin d'ajuster l'âge après cette période. Si plus d'une période est observée sur une même tige on ajoute d'autres variables binaires $Z_i$ et le modèle est ajusté en conséquence. Le résultat de cette correction, illustré à la figure 5, permet de constater l'ajustement de la courbe hauteur-âge sur une tige de Sapin baumier. Comme dans le cas de la correction de la période d'oppression, chaque tige ajustée par cette procédure a été comparée aux tiges de la même espèce exempte d'indices de défoliation et ayant crû sur le même type écologique. Cette vérification permettait de s'assurer d'un ajustement adéquat sans surestimation de la croissance.

La correction de l'âge pour l'oppression et la réduction de croissance attribuable à la défoliation de la TBÉ a permis de retenir 485 tiges pour les fins de modélisation de la croissance en hauteur du Sapin baumier, de l'Épinette blanche et des Épinettes noire et rouge. Le tableau 5 présente les statistiques descriptives des tiges retenues.

### 1.4.2 Description du modèle

Le modèle utilisé prend en compte la corrélation inhérente aux mesures répétées et permet de comparer entre elles des courbes hauteur-âge des arbres d'une même espèce, en fonction des types écologiques. Ce modèle prend également compte le déséquilibre causé par le nombre inégal de mesures, puisque le nombre de disques prélevés varie en fonction de la hauteur de chaque arbre. Le modèle est non linéaire à coefficients aléatoires applicables à des données de croissance. Il permet l'incorporation d'une structure de corrélation issue d'un processus autorégressif de premier ordre pour les erreurs des observations en provenance d'un même individu. Il s'inspire des travaux de LINDSTROM et BATES (1990). Le modèle général de régression non linéaire mixte est le suivant :

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}_i, \mathbf{X}_i) + \mathbf{e}_i,$$

$$\boldsymbol{\phi}_i = \mathbf{A}_i\boldsymbol{\beta} + \mathbf{B}_i\mathbf{b}_i, \quad \mathbf{b}_i \rightarrow N(\mathbf{0}, \boldsymbol{D}), \quad \mathbf{e}_i \rightarrow N(\mathbf{0}, \sigma^2\boldsymbol{\Lambda}_i),$$

où $\mathbf{y}_i$ est un vecteur de $n_i$ mesures répétées recueillies auprès de l'individu i; $\mathbf{X}_i$ est une matrice de variables explicatives; $\boldsymbol{\phi}_i$ est un vecteur de *r* paramètres; $\boldsymbol{\beta}$ est un vecteur de *p* paramètres de population fixes; $\mathbf{b}_i$ est un vecteur de *q* effets aléatoires; $\mathbf{A}_i$ et $\mathbf{B}_i$ sont des matrices d'incidence de dimensions $r \times p$ et $r \times q$ respectivement; et enfin $\mathbf{e}_i$ est un vecteur d'erreurs aléatoires. Ajoutons que les $\mathbf{e}_i$ sont supposés indépendants et d'une distribution normale avec matrice de variances covariances $\sigma^2\boldsymbol{\Lambda}_i$, que les $\mathbf{b}_i$ sont aussi considérés indépendants et identiquement distribués

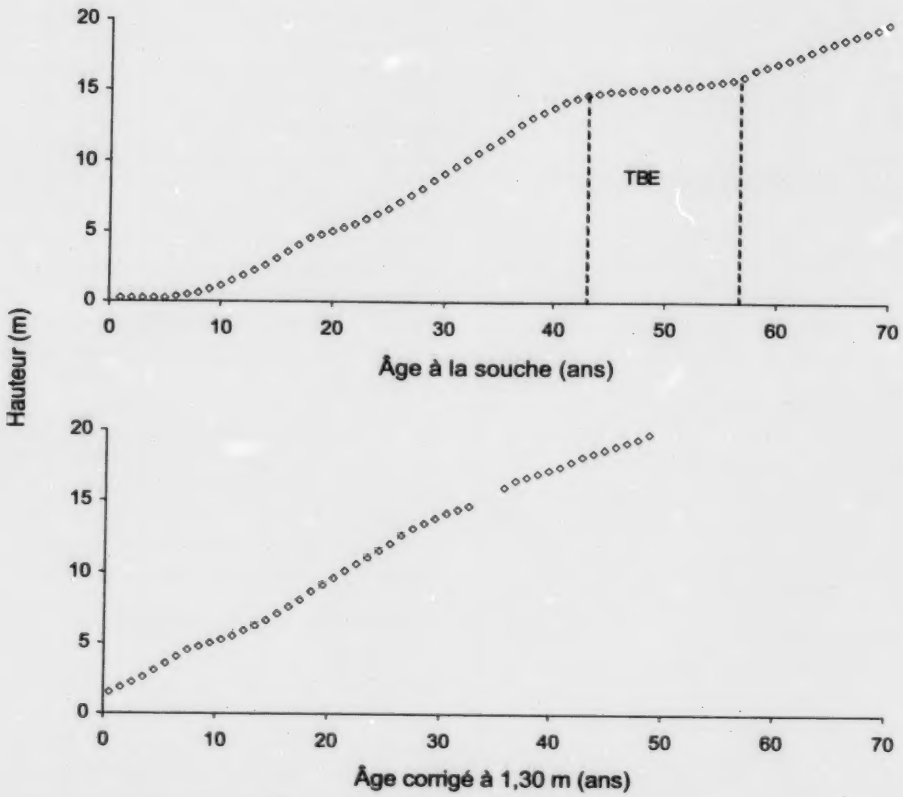



**Figure 5**

Exemple de l'ajustement de la relation hauteur-âge pour corriger l'effet de la Tordeuse des bourgeons de l'Épinette sur une tige de Sapin baumier.

avec moyenne **0** et matrice de variances covariances $\boldsymbol{D}$, et qu'en plus les $\mathbf{b}_i$ et les $\mathbf{e}_i$ sont présumés mutuellement indépendants. La forme qu'arbore $\boldsymbol{\Lambda}_i$ lorsque l'on pose l'hypothèse d'une structure autorégressive d'ordre 1 pour les erreurs et que le temps entre deux mesures successives est constant est :

$$\boldsymbol{\Lambda}_i = \begin{pmatrix} 1 & \rho & \rho^2 & \cdot & \cdot & \cdot & \rho^{n_i-1} \\ \rho & 1 & \rho & \rho^2 & & & \cdot \\ \rho^2 & \rho & 1 & \rho & \rho^2 & & \cdot \\ \cdot & \rho^2 & \rho & 1 & \rho & \rho^2 & \cdot \\ \cdot & & \rho^2 & \rho & 1 & \rho & \rho^2 \\ \cdot & & & \rho^2 & \rho & 1 & \rho \\ \rho^{n_i-1} & \cdot & \cdot & \cdot & \rho^2 & \rho & 1 \end{pmatrix}$$

Définissons enfin le vecteur $\boldsymbol{\theta}$ qui est composé des paramètres uniques de $\boldsymbol{D}$ ainsi que de $\rho$ et $\sigma^2$. L'équation utilisée comme il a été mentionné précédemment est celle de Chapman-Richards avec trois paramètres (Équation 1). Ce modèle a été retenu puisqu'il avait permis de modéliser adéquatement les données d'analyses de tiges recueillies en 1991 (Lapointe 1995). Ce modèle non linéaire permet de produire des courbes polymorphes. Il est également reconnu pour son ajustement précis des données de croissance des arbres et des peuplements forestiers (Zeide 1993). Afin de réaliser cette modélisation, la macro NLINMIX de SAS a été employée (Littel *et al.* 1996). Les tests pour la comparaison des courbes selon l'essence et le type écologique sont du type de Wald, tels que suggérés par Vonesh et Carter (1992). Ces tests sont basés sur la distribution

**Tableau 5**

Statistiques descriptives des tiges retenues pour la modélisation

| Variable | N | Minimum | Maximum | Moyenne | Écart type |
|---|---|---|---|---|---|
| **Épinette blanche** | | | | | |
| DHP (mm) | 103 | 171,0 | 439,4 | 250,6 | 43,3 |
| Hauteur totale (m) | 103 | 12,3 | 24,1 | 18,1 | 2,1 |
| Âge à la souche (ans) | 103 | 36,0 | 178,0 | 82,1 | 29,4 |
| Âge à 1,30 m (ans) | 103 | 26,5 | 144,5 | 64,6 | 23,9 |
| Âge corrigé (ans) | 103 | 26,5 | 123,1 | 51,6 | 14,5 |
| **Épinettes noire et rouge** | | | | | |
| DHP (mm) | 129 | 153,4 | 358,1 | 234,1 | 38,5 |
| Hauteur totale (m) | 129 | 12,3 | 22,4 | 17,5 | 2,2 |
| Âge à la souche (ans) | 129 | 51,0 | 200,0 | 104,7 | 39,0 |
| Âge à 1,30 m (ans) | 129 | 42,5 | 185,0 | 86,1 | 33,9 |
| Âge corrigé (ans) | 129 | 35,0 | 164,5 | 70,5 | 26,6 |
| **Sapin baumier** | | | | | |
| DHP (mm) | 253 | 152,7 | 354,9 | 232,6 | 39,1 |
| Hauteur totale (m) | 253 | 11,4 | 23,8 | 17,4 | 2,3 |
| Âge à la souche (ans) | 253 | 42,0 | 195,0 | 77,4 | 22,0 |
| Âge à 1,30 m (ans) | 253 | 31,8 | 193,2 | 61,8 | 19,6 |
| Âge corrigé (ans) | 253 | 31,3 | 114,1 | 51,3 | 12,6 |
| **Toutes** | | | | | |
| DHP (mm) | 485 | 152,7 | 439,4 | 236,8 | 40,4 |
| Hauteur totale (m) | 485 | 11,4 | 24,1 | 17,6 | 2,2 |
| Âge à la souche (ans) | 485 | 36,0 | 200,0 | 85,6 | 31,2 |
| Âge à 1,30 m (ans) | 485 | 26,5 | 193,2 | 68,9 | 27,1 |
| Âge corrigé (ans) | 485 | 26,5 | 164,5 | 56,4 | 19,6 |

[a] Nombre total de tiges

asymptotique des paramètres et ne sont valides que pour de grands échantillons. La forme générale de l'hypothèse dont chacune des comparaisons constitue un cas particulier est la suivante : $H_0$: $\mathbf{A}(\boldsymbol{\beta}) = \mathbf{0}$ contre $H_1$: $\mathbf{A}(\boldsymbol{\beta}) \neq \mathbf{0}$. Le test de cette dernière, dénoté selon $\mathbf{L}$ le Jacobien de $\mathbf{l}$, $\mathbf{L} = \partial \mathbf{A}(\boldsymbol{b})/\partial \boldsymbol{b}'$, peut se faire en utilisant la statistique suivante :

$$W(\hat{\theta}) = \mathbf{l}'(\hat{\beta}(\hat{\theta}))[\mathbf{L}(\hat{\beta}(\hat{\theta}))\hat{\Omega}(\hat{\theta})\mathbf{L}'(\hat{\beta}(\hat{\theta}))]^{-1}\mathbf{l}(\hat{\beta}(\hat{\theta}))$$

où $\hat{\boldsymbol{\Omega}}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ est l'estimé de la matrice de variance covariance de $\boldsymbol{\beta}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$, $v$ est le nombre de restrictions sous l'hypothèse nulle. Cette statistique est distribuée de façon asymptotique, sous $H_0$, selon une loi du khi-deux avec $v$ degrés de liberté.

Pour conserver un seuil global au plus égal à $\alpha$ (0,05), les tests de chacune des comparaisons ont été effectués à un seuil local de $\alpha$/m, m étant le nombre de comparaisons faites. Il s'agit de la correction de Bonferroni pour le seuil (NETER et WASSERMAN 1974).

Le coefficient de détermination $R^2$ utilisé est un coefficient corrigé pour une équation non linéaire (WILKINSON 1990b *dans* WANG et KLINKA 1996). Malgré que ce coefficient ne soit pas nécessairement situé entre 0 et 1, il permet tout de même d'exprimer la valeur explicative du modèle (WANG et KLINKA 1996). Finalement, l'indice de qualité de station potentiel ($IQS_{pot}$) a été calculé pour chaque essence selon le type écologique d'après l'équation de Chapman-Richards pour un âge de 50 ans.

# Chapitre deux

# Résultats et discussion

## 2.1 Courbes spécifiques selon le type écologique

La modélisation de la croissance en hauteur en fonction de l'âge pour le Sapin baumier, l'Épinette blanche et les Épinettes noire et rouge a permis de produire 23 courbes spécifiques des types écologiques étudiés. Le tableau 6 présente les résultats obtenus pour le nombre de tiges, l'$IQS_{pot}$ et son écart type, les valeurs des trois paramètres de l'équation de Chapman-Richards ainsi que leur écart type respectif. Le paramètre $b_1$ représente l'asymptote de la courbe et les paramètres $b_2$ et $b_3$ les points d'inflexion. Les coefficients de détermination des équations ($R^2$) obtenues varient de 0,87 à 0,97, ce qui permet d'affirmer que le modèle utilisé exprime convenablement la croissance en hauteur en fonction de l'âge de toutes les essences. Les paramètres des équations montrent qu'il existe des différences et des similitudes pour les essences selon leurs types écologiques. De plus, les $IQS_{pot}$ permettent d'ordonner les types écologiques en fonction de leur potentiel de croissance. Les écarts types calculés nous démontrent cependant qu'il existe une certaine variabilité pour un même type écologique. De plus, les coefficients de variation se situant entre 3 et 23 % démontrent que la variabilité n'est pas constante d'un type écologique à l'autre. Cependant, il semble que les types écologiques mal drainés (RS22 et RC22) présentent généralement une variabilité des $IQS_{pot}$ plus grande pour chacune des espèces.

À la lumière de ces résultats, le Sapin baumier et l'Épinette blanche montrent des potentiels de croissance semblables. On remarque pour ces espèces que les stations à drainage moyen sur des dépôts relativement épais donnent les $IQS_{pot}$ les plus élevés. Les $IQS_{pot}$ varient de 17,9 à 20,2 m pour les types écologiques des érablières à Bouleau jaune (FE31, FE32) et des sapinières à Bouleau jaune (MS12, MS13). Les types écologiques caractérisés par des dépôts minces et pierreux et aux drainages rapides et lents, montrent des $IQS_{pot}$ plus faibles variant de 13,1 à 17,3 m. La cédrière à Sapin sur dépôts organiques mal drainés (RC22) produit la plus faible croissance pour le Sapin baumier. Cependant, il est un peu étonnant de constater que l'$IQS_{pot}$ le plus faible pour l'Épinette blanche soit celui de la sapinière à Thuya hydrique (RS22) avec 13,1 m alors que celui la cédrière à Sapin est de 14,4 m. Il est toutefois possible, en dépit du très mauvais drainage de la cédrière à Sapin (RC22), que l'écoulement de l'eau permette d'assurer un bon apport en éléments nutritifs et favorise la croissance sur ces stations, comme le sous-entendent Larocque *et al.* (1996). Toutefois, cette situation n'est pas observée pour les autres essences.

En ce qui concerne les Épinettes noire et rouge, les mêmes tendances générales s'appliquent, sauf que le meilleur potentiel de croissance obtenu est celui du type écologique de la sapinière à Épinette rouge mésique (RS42) dont l'$IQS_{pot}$ est de 17,2 m. Il faut toutefois admettre que le faible échantillonnage réalisé dans le type écologique de la sapinière à Bouleau jaune mésique (MS12) ne permet pas de bien évaluer le potentiel de ces espèces sur cette station, où l'on aurait pu s'attendre à un $IQS_{pot}$ supérieur à celui de la sapinière à Épinette rouge mésique (RS42). Cependant, la faible fréquence de ces espèces dans ce type écologique explique le faible nombre de tiges échantillonnées. Ce phénomène peut s'expliquer par la faible compétitivité des Épinettes noire et rouge par rapport au Sapin baumier sur ces stations. En effet, il semble que ces espèces supportent moins bien l'ombre que le Sapin baumier, bien qu'il existe certaines divergences à ce sujet en ce qui concerne l'Épinette rouge (Burns et Honkala 1990). Comparativement à l'Épinette rouge, le Sapin baumier aurait également une meilleure croissance une fois libéré (Hart 1968).

Les courbes hauteur-âge spécifiques obtenues à partir de la modélisation des données brutes sont illustrées à la figure 6. Elles permettent de visualiser les différences et les similitudes entre les types écologiques. La majorité des courbes présentent des formes similaires, bien que les stations les moins fertiles affichent une courbe de forme plus linéaire que les stations plus fertiles. Il existe cependant deux exceptions. Pour l'Épinette blanche, la courbe de croissance en hauteur du type écologique de la sapinière à Épinette rouge hydrique (RS43) présente une asymptote plus faible que les autres courbes des types écologiques

**Tableau 6**

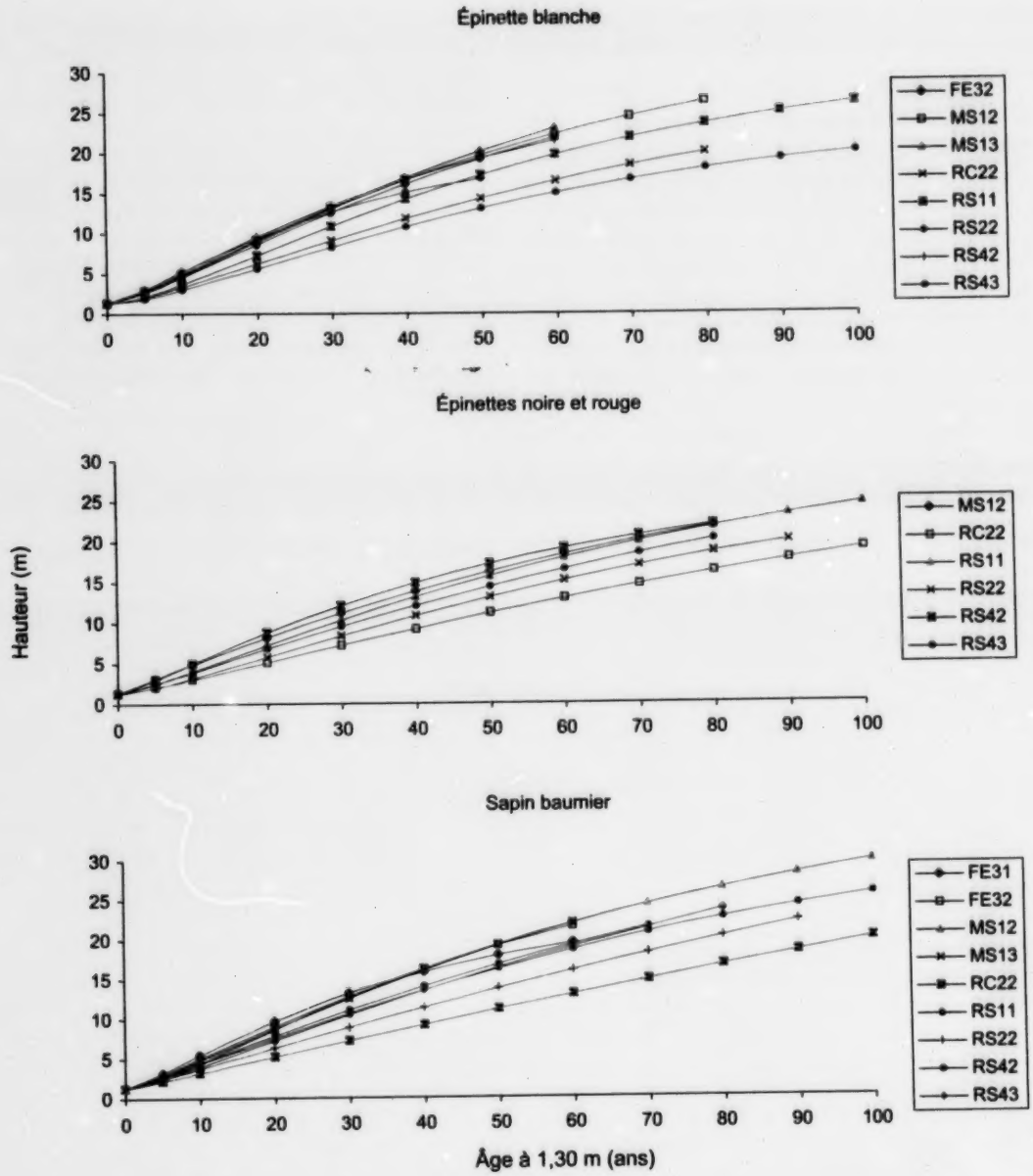
$IQS_{pot}$ et coefficients de régression selon le type écologique

| Type écologique[a] | n | $IQS_{pot}$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $r^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Épinette blanche** | | | | | | |
| MS13 | 696 | 20,2 ± 2,0 | 37,55 ± 2,20 | 0,0184 ± 0,0015 | 1,3499 ± 0,0362 | 0,94 |
| MS12 | 634 | 19,8 ± 2,6 | 34,03 ± 1,79 | 0,0197 ± 0,0015 | 1,3054 ± 0,0345 | 0,92 |
| RS42 | 147 | 19,4 ± 3,4 | 29,21 ± 2,53 | 0,0234 ± 0,0028 | 1,2918 ± 0,0614 | 0,87 |
| FE32 | 195 | 19,3 ± 1,3 | 34,01 ± 3,52 | 0,0198 ± 0,0030 | 1,3740 ± 0,0788 | 0,97 |
| RS11 | 260 | 17,3 ± 2,6 | 29,98 ± 1,90 | 0,0222 ± 0,0013 | 1,5772 ± 0,0668 | 0,95 |
| RS43 | 105 | 16,8 ± 1,0 | 19,35 ± 2,07 | 0,0388 ± 0,0036 | 1,4114 ± 0,0892 | 0,99 |
| RC22 | 141 | 14,4 ± 1,8 | 27,47 ± 3,38 | 0,0186 ± 0,0032 | 1,4754 ± 0,1182 | 0,94 |
| RS22 | 496 | 13,1 ± 1,9 | 22,93 ± 1,44 | 0,0217 ± 0,0016 | 1,6106 ± 0,0753 | 0,94 |
| **Épinettes noire et rouge** | | | | | | |
| RS42 | 912 | 17,2 ± 2,6 | 26,02 ± 1,02 | 0,0219 ± 0,0010 | 1,2070 ± 0,0227 | 0,91 |
| MS12 | 164 | 16,2 ± 1,5 | 34,21 ± 3,24 | 0,0119 ± 0,0015 | 1,0363 ± 0,0366 | 0,93 |
| RS11 | 291 | 15,7 ± 1,4 | 31,80 ± 2,34 | 0,0152 ± 0,0015 | 1,2594 ± 0,0444 | 0,96 |
| RS43 | 797 | 14,4 ± 1,5 | 34,15 ± 2,40 | 0,0114 ± 0,0012 | 1,1489 ± 0,0305 | 0,95 |
| RS22 | 312 | 13,1 ± 1,8 | 27,77 ± 2,65 | 0,0155 ± 0,0020 | 1,3908 ± 0,0725 | 0,92 |
| RC22 | 1758 | 11,1 ± 2,0 | 32,16 ± 1,18 | 0,0096 ± 0,0005 | 1,2318 ± 0,0246 | 0,91 |
| **Sapin baumier** | | | | | | |
| FE32 | 1687 | 19,2 ± 1,8 | 29,15 ± 0,88 | 0,0257 ± 0,0015 | 1,5134 ± 0,0463 | 0,93 |
| MS12 | 596 | 19,2 ± 2,4 | 38,90 ± 1,50 | 0,0146 ± 0,0009 | 1,1820 ± 0,0193 | 0,89 |
| MS13 | 1229 | 19,2 ± 1,9 | 38,70 ± 2,01 | 0,0153 ± 0,0012 | 1,2348 ± 0,0259 | 0,94 |
| FE31 | 165 | 17,9 ± 0,6 | 22,43 ± 0,81 | 0,0314 ± 0,0028 | 1,2929 ± 0,0642 | 0,97 |
| RS42 | 407 | 16,8 ± 1,9 | 38,72 ± 4,05 | 0,0120 ± 0,0019 | 1,1569 ± 0,0401 | 0,92 |
| RS43 | 596 | 16,3 ± 3,2 | 54,15 ± 7,41 | 0,0073 ± 0,0014 | 1,0782 ± 0,0304 | 0,84 |
| RS11 | 631 | 16,2 ± 2,1 | 32,86 ± 1,90 | 0,0158 ± 0,0015 | 1,3032 ± 0,0403 | 0,90 |
| RS22 | 610 | 13,7 ± 2,6 | 55,37 ± 11,01 | 0,0058 ± 0,0016 | 1,0873 ± 0,0381 | 0,88 |
| RC22 | 283 | 11,1 ± 2,6 | 61,98 ± 23,21 | 0,0040 ± 0,0020 | 1,0798 ± 0,0584 | 0,91 |

[a] FE31 : érablière à Bouleau jaune et Hêtre; FE32 : érablière à Bouleau jaune; MS12 : sapinière à Bouleau jaune mésique; MS13 : sapinière à Bouleau jaune subhydrique; RC22 : cédrière à Sapin; RS11 : sapinière à Thuya xérique; RS22 : sapinière à Thuya hydrique; RS42 : sapinière à Épinette rouge mésique; RS43 : sapinière à Épinette rouge hydrique.

[b] nombre de couples hauteur-âge.

pour cette essence. Cette forme s'explique probablement par le manque d'observations après l'âge de 50 ans. Toutefois, il est possible que les caractéristiques de stations puissent expliquer cette différence. Rappelons que ce type écologique (RS43) est caractérisé par un mauvais drainage et des dépôts de texture grossière. Ces caractéristiques empêcheraient le développement en profondeur du système racinaire et entraveraient la croissance de sorte que les racines ne peuvent puiser l'eau lors des baisses de la nappe phréatique (Schmidt et Carmean 1988). Une forme de croissance semblable s'observe pour la courbe hauteur-âge du Sapin baumier du type écologique de l'érablière à Bouleau jaune et Hêtre (FE31). Toutefois, dans ce cas, mis à part le manque d'observations, les caractéristiques de la station et la compétition exercée par les espèces feuillues peuvent expliquer la forme de la courbe. En effet, le drainage rapide et les dépôts minéraux minces observés dans ces stations, jumelés au surcimage occasionné par les essences feuillues peuvent expliquer cette différence de forme. Cette diminution de croissance pourrait être attribuable en partie aux sols minces généralement observés pour ce type écologique. Cette situation occasionne une contrainte d'espaces pour le développement racinaire et un manque de lumière causé par la compétition




FE31 : érablière à Bouleau jaune et Hêtre; FE32 : érablière à Bouleau jaune; MS12 : sapinière à Bouleau jaune mésique; MS13 : sapinière à Bouleau jaune subhydrique; RC22 : cédrière à Sapin; RS11 : sapinière à Thuya xérique; RS22 : sapinière à Thuya hydrique; RS42 : sapinière à Épinette rouge mésique; RS43 : sapinière à Épinette rouge hydrique.

**Figure 6**

**Courbes hauteur-âge selon le type écologique.**

des essences feuillues. Un échantillonnage plus exhaustif serait cependant nécessaire pour vérifier la justesse de ces hypothèses.

### 2.2 Étude comparative des types écologiques

Les résultats des études comparatives de la croissance des types écologiques réalisées grâce aux tests de Wald pour un seuil global de 5 % sont présentés pour chacune des espèces au tableau 7. On remarque qu'il existe des différences significatives de croissance entre plusieurs types écologiques. En contrepartie, il semble que certains montrent des similitudes. Malgré que les résultats des tests de Wald montrent des différences statistiquement significatives, quelques types écologiques ont tout de même été regroupés en raison de leurs caractéristiques écologiques et de leur croissance analogues. L'utilisation des tests de Wald permet de distinguer les types écologiques de courbes hauteur-âge différentes puisqu'elle s'appuie non seulement sur l'$IQS_{pot}$ mais également sur la forme de la courbe.

Dans d'autres cas, les seuils observés pour la comparaison des courbes suggèrent le regroupement de certains types écologiques. Dans certaines circonstances, la courbe moyenne, l'$IQS_{pot}$ et les caractéristiques de station de certains types écologiques démontrent tout de même une différence marquée même si le test de Wald n'en détecte pas. C'est le cas des types écologiques qui présentent une grande variabilité de croissance attribuable, d'une part, au nombre

**Tableau 7**

Seuils observés des comparaisons des courbes hauteur-âge selon le type écologique

| Type écologique[a] | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Épinette blanche** | | | | | | | | |
| MS12 | – | 0,3036 | | | | | | |
| MS13 | – | 0,7555 | 0,0081 | | | | | |
| RC22 | – | 0,0004 | 0,0001* | 0,0001* | | | | |
| RS11 | – | 0,0184 | 0,0001* | 0,0004* | 0,1121 | | | |
| RS22 | – | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,5724 | 0,0014 | | |
| RS42 | – | 0,0023 | 0,0301 | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | |
| RS43 | – | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* |
| **Épinettes noire et rouge** | | | | | | | | |
| RC22 | – | – | 0,0001* | – | | | | |
| RS11 | – | – | 0,0001* | – | 0,0001* | | | |
| RS22 | – | – | 0,0001* | – | 0,0099 | 0,0015 | | |
| RS42 | – | – | 0,0001* | – | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | |
| RS43 | – | – | 0,0001* | – | 0,0001* | 0,0774 | 0,0009* | 0,0001* |
| **Sapin baumier** | | | | | | | | |
| FE32 | 0,0001* | | | | | | | |
| MS12 | 0,0001* | 0,0001* | | | | | | |
| MS13 | 0,0001* | 0,0001* | 0,0589 | | | | | |
| RC22 | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | | | | |
| RS11 | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | | | |
| RS22 | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,6567 | 0,0001* | | |
| RS42 | 0,0001* | 0,0001* | 0,0034 | 0,0004* | 0,0023 | 0,0460 | 0,0317 | |
| RS43 | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0001* | 0,0919 | 0,0001* | 0,3382 | 0,2610 |

[a] FE31 : érablière à Bouleau jaune et Hêtre; FE32 : érablière à Bouleau jaune; MS12 : sapinière à Bouleau jaune mésique; MS13 : sapinière à Bouleau jaune subhydrique; RC22 : cédrière à Sapin; RS11 : sapinière à Thuya xérique; RS22 : sapinière à Thuya hydrique; RS42 : sapinière à Épinette rouge mésique; RS43 : sapinière à Épinette rouge hydrique, (*) indique une différence significative ($\alpha \leq 0,05$) selon la correction de Bonferroni.

**Tableau 8**

## $IQS_{pot}$ et coefficients des courbes hauteur-âge selon le groupe de types écologiques

| | Écologiques[b] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | **Épinette blanche** | | | |
| A | FE32,MS12,MS13,RS42 | 1672 | 19,8 | 34,60 ± 1,16 | 0,0197 ± 0,0009 | 1,3312 ± 0,0224 | 0,93 |
| B | RS11 | 637 | 17,2 | 29,99 ± 1,92 | 0,0222 ± 0,0014 | 1,5774 ± 0,0672 | 0,95 |
| C | RS43 | 260 | 16,8 | 19,35 ± 2,09 | 0,0388 ± 0,0037 | 1,4112 ± 0,0896 | 0,99 |
| D | RC22,RS22 | 105 | 13,4 | 23,89 ± 1,32 | 0,0210 ± 0,0014 | 1,5760 ± 0,0635 | 0,93 |
| | | | | **Épinettes noire et rouge** | | | |
| A | RS42 | 912 | 17,2 | 26,02 ± 1,02 | 0,0219 ± 0,0010 | 1,2069 ± 0,0227 | 0,93 |
| B | MS12 | 164 | 16,2 | 34,22 ± 3,24 | 0,0119 ± 0,0015 | 1,0363 ± 0,0366 | 0,91 |
| C | RS11,RS43 | 1088 | 14,8 | 32,65 ± 1,63 | 0,0129 ± 0,0009 | 1,1904 ± 0,0254 | 0,95 |
| D | RS22 | 312 | 13,1 | 27,78 ± 2,66 | 0,0155 ± 0,0020 | 1,3907 ± 0,0726 | 0,92 |
| E | RC22 | 1758 | 11,1 | 32,17 ± 1,18 | 0,0096 ± 0,0005 | 1,2317 ± 0,0246 | 0,91 |
| | | | | **Sapin baumier** | | | |
| A | FE32,MS12,MS13 | 3512 | 19,2 | 36,70 ± 0,89 | 0,0164 ± 0,0007 | 1,2375 ± 0,0146 | 0,91 |
| B | FE31 | 165 | 17,9 | 22,45 ± 0,81 | 0,0314 ± 0,0028 | 1,2917 ± 0,0646 | 0,97 |
| C | RS11,RS42,RS43 | 1634 | 16,4 | 41,88 ± 2,37 | 0,0107 ± 0,0009 | 1,1562 ± 0,0207 | 0,87 |
| D | RS22 | 610 | 13,7 | 57,07 ± 11,78 | 0,0056 ± 0,0016 | 1,0823 ± 0,0377 | 0,88 |
| E | RC22 | 283 | 11,1 | 64,08 ± 24,91 | 0,0038 ± 0,0020 | 1,0755 ± 0,0578 | 0,91 |

[a] lettre identifiant le regroupement.

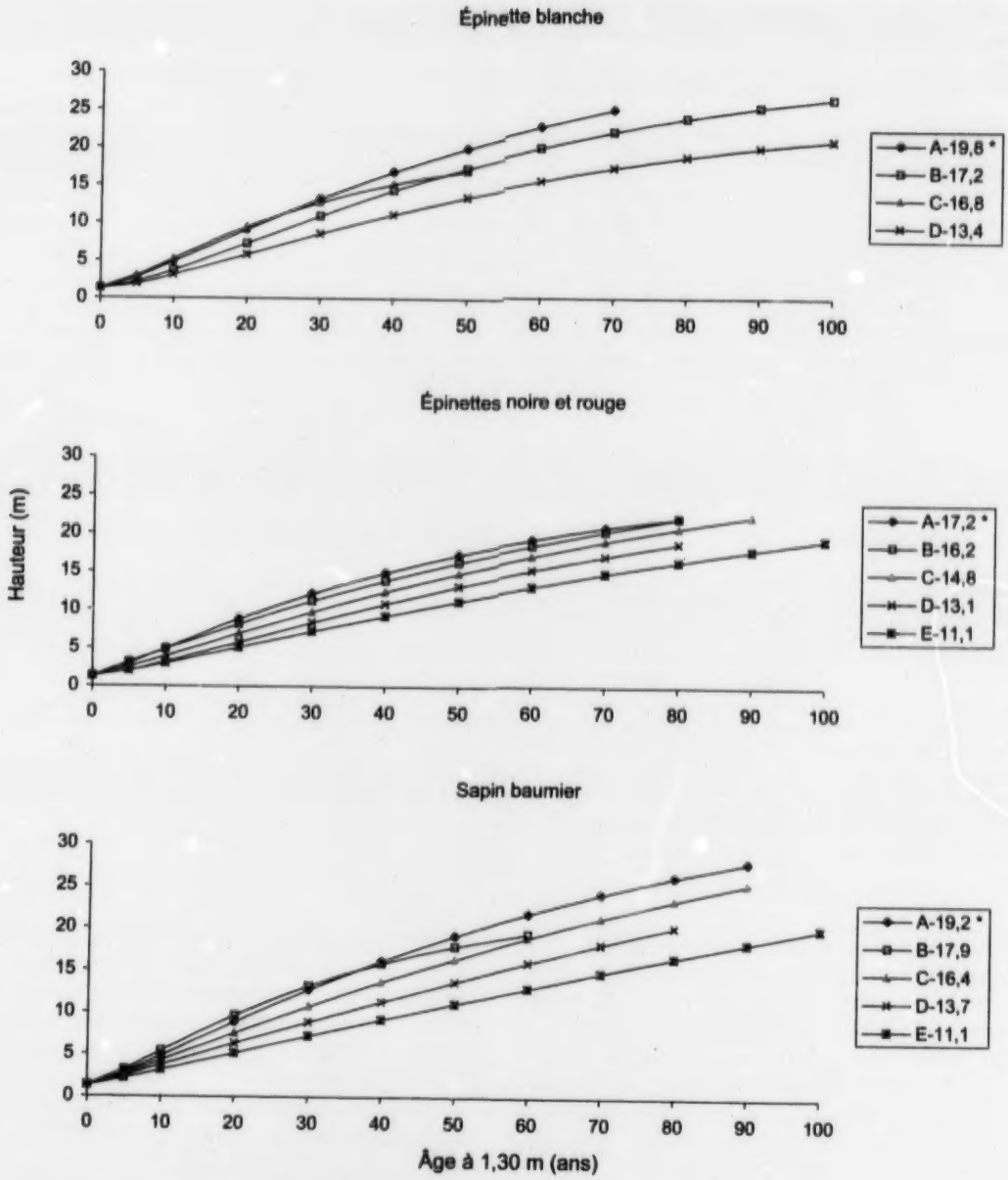
[b] FE31 : érablière à Bouleau jaune et Hêtre; FE32 : érablière à Bouleau jaune; MS12 : sapinière à Bouleau jaune mésique; MS13 : sapinière à Bouleau jaune subhydrique; RC22 : cédrière à sapin; RS11 : sapinière à Thuya xérique; RS22 : sapinière à Thuya hydrique; RS42 : sapinière à Épinette rouge mésique; RS43 : sapinière à Épinette rouge hydrique.

[c] nombre de couples hauteur-âge.

restreint d'observations et, d'autre part, aux types écologiques de conditions de station moins homogènes. L'analyse des différents résultats obtenus pour la comparaison de la croissance entre les types écologiques a permis le regroupement de certains d'entre eux. Le tableau 8 présente les regroupements effectués, les $IQS_{pot}$ et les paramètres des courbes synthèses selon l'essence. De plus, la figure 7 illustre les courbes synthèses obtenues à la suite des regroupements. Ces regroupements sont discutés dans les paragraphes qui suivent pour chaque essence.

### 2.2.1 Épinette blanche

Pour l'Épinette blanche, quatre $IQS_{pot}$ ont été retenus. La station la plus fertile présente un $IQS_{pot}$ de 19,8 m et est formée des types écologiques de l'érablière à Bouleau jaune (FE32), des sapinières à Bouleau jaune mésiques et subhydriques (MS12, MS13) ainsi que de la sapinière à Épinette rouge mésique (RS42). Bien que les trois premiers types écologiques aient des caractéristiques physiques (type de dépôt, classe de drainage) et floristiques (espèces indicatrices) semblables, la sapinière à Épinette rouge mésique (RS42) s'y distingue par un groupe écologique différent et par des dépôts plus pierreux et sablonneux généralement moins fertiles. Un échantillonnage plus important serait cependant nécessaire afin de confirmer le regroupement de ce dernier type écologique avec les meilleures stations de l'Épinette blanche. En effet, en prenant en compte ses caractéristiques, la sapinière à Épinette rouge devrait présenter une croissance plus faible que les autres types écologiques de ce groupe. Cependant, il faut reconnaître que l'Épinette blanche n'est pas très abondante sur ce type de station (RS42) où le Sapin baumier, l'Épinette rouge et l'Épinette noire dominent (Grondin *et al.* 1995b). Les stations de fertilité moyenne présentent des $IQS_{pot}$ de 17,2 et




* la lettre indique le groupe présenté au tableau 8 et l'$IQS_{pot}$ suit le tiret (-)

**Figure 7**

Courbes hauteur-âge synthèses et indice de qualité de station potentiel.

16,8 m. Il s'agit respectivement de la sapinière à Thuya xérique (RS11) et de la sapinière à Épinette rouge hydrique (RS43). Bien que ces deux types écologiques aient des $IQS_{pot}$ semblables, ils présentent tout de même des différences de croissance significatives. Néanmoins, il faut noter que leur faible taux d'échantillonnage ne permet pas de vérifier la validité des résultats obtenus. Le quatrième et dernier groupe est formé des types écologiques de la sapinière à Thuya hydrique et de la cédrière à Sapin (RC22) puisqu'ils ne présentent pas de différences significatives de croissance. Cette situation peut s'expliquer par le manque de données relatives à la croissance de l'Épinette blanche pour la cédrière à Sapin (RC22). Il est tout de même étonnant de constater que ce type écologique a un $IQS_{pot}$ supérieur à celui de la sapinière à Thuya hydrique (RS22). Mais pour les raisons discutées plus haut, il est possible que dans certaines situations les dépôts organiques offrent une bonne fertilité.

### 2.2.2 Épinettes noire et rouge

L'analyse des seuils présentés au tableau 7 pour les Épinettes noire et rouge permet de vérifier que les types écologiques de la sapinière à Bouleau jaune mésique (MS12) et de la sapinière à Épinette rouge mésique (RS42) se distinguent des autres types écologiques. Ce dernier type écologique offre le meilleur potentiel de croissance avec un $IQS_{pot}$ de 17,2 m. Le deuxième type écologique est celui de la sapinière à Bouleau jaune mésique (MS12) avec un $IQS_{pot}$ de 16,2 m. Le troisième groupe est formé de la sapinière à Thuya xérique (RS11) et de la sapinière à Épinette rouge hydrique (RS43) et présente un $IQS_{pot}$ de 14,8 m. Les résultats relatifs à ces deux types écologiques diffèrent de ceux obtenus pour l'Épinette blanche. Cependant, le nombre d'observations retenues ici permettent d'obtenir une meilleure fiabilité des résultats. Le type écologique de la sapinière à Épinette rouge hydrique (RS43) présente un $IQS_{pot}$ inférieur à la sapinière à Thuya xérique (RS11), mais le test de Wald indique que cette différence n'est pas statistiquement significative. Bien qu'ils se retrouvent dans des conditions écologiques différentes, ces types écologiques présentent tout de même des similitudes. Ils montrent également des contraintes de développement racinaire attribuables à la nature des dépôts et à la classe de drainage. Le type écologique de la sapinière à Épinette rouge hydrique (RS43) est généralement rencontré sur des tills délavés très pierreux ou sur des dépôts sablonneux et mal drainés tandis que la sapinière à Thuya xérique (RS11) se trouve habituellement sur des tills ou des dépôts d'altérations minces à drainage rapide. Finalement, les types écologiques de la sapinière à Thuya hydrique (RS22) et de la cédrière à Sapin (RC22) n'ont pas été regroupés bien qu'ils ne démontrent pas de différences significatives selon le test de Wald. Cependant, leurs $IQS_{pot}$ respectifs de 13,1 et de 11,1 m présentent une différence de 2 m ce qui est plus important que dans le cas de l'Épinette blanche où la différence n'était que de 1,3 m entre ces deux stations. De plus, il faut reconnaître que leurs caractéristiques de station sont différentes. Le premier (RS22) se distingue par des dépôts minéraux et un mauvais drainage tandis que le second se caractérise par des dépôts organiques très mal drainés.

### 2.2.3 Sapin baumier

Le Sapin baumier est la seule essence présente sur l'ensemble des stations étudiées, ce qui en fait l'essence la plus intéressante pour comparer la croissance entre les types écologiques. Bien que les comparaisons statistiques des courbes montrent des différences significatives entre plusieurs types écologiques, l'examen des $IQS_{pot}$ présentés au tableau 6 et les courbes de la figure 6 proposent le regroupement de certains d'entre eux. Cette analyse a permis la formation de cinq groupes distincts pour le Sapin baumier (Tableau 8 et Figure 7). Le premier groupe est formé de l'érablière à Bouleau jaune (FE32) et des sapinières à Bouleau jaune (MS12, MS13), avec un $IQS_{pot}$ de 19,2 m. Ces types écologiques ont des caractéristiques communes au point de vue du type de dépôt, du régime hydrique et des espèces indicatrices. Bien que le type écologique de la sapinière à Bouleau jaune subhydrique profite généralement d'un enrichissement du sol en raison de l'écoulement latéral de l'eau, les résultats des tests de Wald n'indiquent aucune différence significative avec les autres types écologiques de ce groupe (Tableau 7). Ce dernier présente tout de même l'$IQS_{pot}$ spécifique le plus élevé (Tableau 6). Le type écologique de l'érablière à Bouleau jaune et Hêtre présente un $IQS_{pot}$ de 17,9 m, ce qui permet de le classer au deuxième rang. Il affiche toutefois une forme de croissance différente, bien que la courbe hauteur-âge est semblable à celle du premier groupe jusqu'à l'âge de 40 ans. Cependant, comme il a été discuté plus haut, le manque d'observations pour ce type écologique ne nous permet pas de vérifier la validité de ces résultats. Toutefois, la faible épaisseur des dépôts, le drainage rapide et la dominance des espèces feuillues sur ces stations sont des hypothèses plausibles pour expliquer cette différence. Le troisième groupe est formé des types écologiques de la sapinière à Thuya xérique (RS11) et des sapinières à Épinette rouge mésique et hydrique (RS42 et RS43). Ce groupe se caractérise par la présence du groupe écologique PLS. Bien que la sapinière à Thuya hydrique (RS22) ne montre pas de différence significative par rapport à la cédrière à Sapin, deux $IQS_{pot}$ ont tout de même été retenus sur la base des différences écologiques de ces stations et la différence de 2,6 m entre leurs $IQS_{pot}$ respectifs.

### 2.3 Comparaison des courbes obtenues avec les courbes de Ker et Bowling (1991)

Afin de pouvoir vérifier la validité des courbes obtenues, nous les avons comparées à l'aide de graphiques aux courbes des indices de station de KER et BOWLING (1991). Le premier élément retenu pour la comparaison des courbes, est la proximité du territoire concerné par cette étude (Nouveau-Brunswick). Le second élément retenu est la similitude des types de stations échantillonnées. Le troisième élément est l'utilisation de la même technique d'échantillonnage, soit l'analyse complète de tiges. Le quatrième élément retenu est l'utilisation d'une équation dérivée de la fonction de Chapman-Richards. Enfin, l'âge à 1,30 m a été retenu pour produire les courbes hauteur-âge. La figure 8 présente les courbes synthèses et celles de KER et BOWLING pour un même IQS de chacune des espèces étudiées. De façon générale, mis à part les courbes de forme particulière dont il a été discuté plus haut, la forme des courbes obtenues coïncide assez bien, du moins en partie, avec celles de KER et BOWLING. Pour les Épinettes noire et rouge, les courbes obtenues se rapprochent sensiblement de celles de KER et BOWLING pour presque l'ensemble des périodes retenues. Par contre, pour l'Épinette blanche et le Sapin baumier, certaines courbes des stations les plus fertiles se démarquent par des valeurs plus élevées au-delà de 50 ans. Certaines de ces courbes croisent même les courbes d'IQS supérieurs. Il s'agit de la courbe du groupe B ($IQS_{pot}$ = 17,2 m) pour l'Épinette blanche et celle du groupe B ($IQS_{pot}$ = 16,2 m) pour les Épinettes noire et rouge et de la courbe du groupe C ($IQS_{pot}$ = 16,4 m) pour le Sapin baumier.

Ces différences peuvent être notamment attribuables à l'ajustement effectué pour les tiges victimes de la défoliation lors des épidémies de TBÉ. En effet, les courbes de KER et BOWLING ont été obtenues à partir de tiges soumises aux attaques de la TBÉ. Il est probable que l'ajustement apporté a pour conséquence d'augmenter la valeur prédite de l'asymptote puisque la dernière épidémie de TBÉ s'est produite dans les dernières années des valeurs observées. Malgré cette hypothèse, il faut se rappeler que l'ajustement effectué pour les périodes de défoliation ne semblaient cependant pas causer de biais. En effet, la comparaison graphique entre les courbes hauteur-âge ajustées et celles obtenues des tiges apparemment non touchées par la TBÉ n'indique pas une surestimation de la croissance. La deuxième hypothèse pouvant expliquer ces différences réside dans le nombre plus restreint de couples hauteur-âge au-delà de la période de 50 ans. Conséquemment, la variation de la valeur prédite après cette période est plus grande. Finalement, les différences en fonction des stations pour une même espèce indiquent qu'il existe vraisemblablement des schémas de croissance spécifiques à la station comme l'a suggéré MONSERUD (1984).

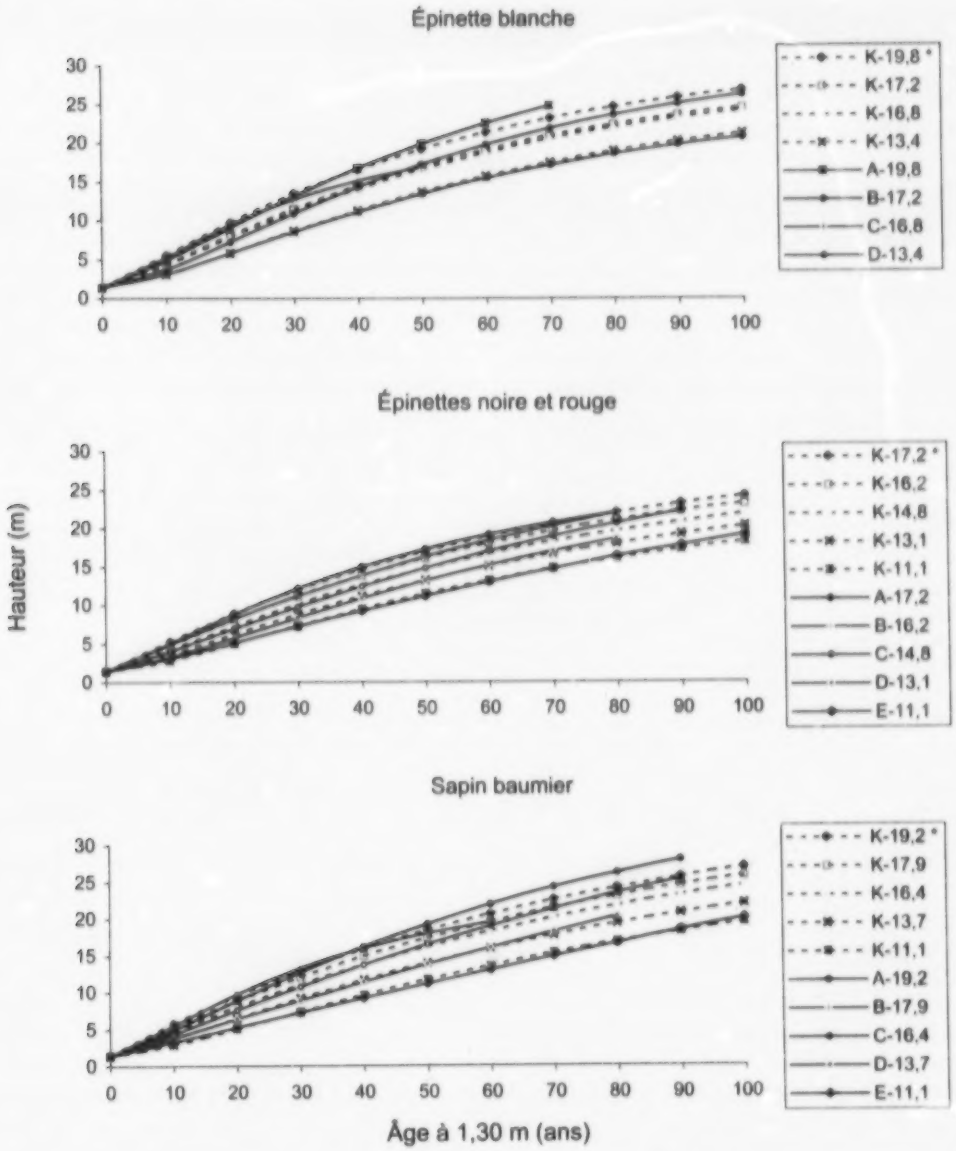
### 2.4 Synthèse des résultats

L'analyse des résultats et le regroupement des types écologiques, exposés dans la section précédente, ont permis de définir cinq indices synthèses de croissance. Le tableau 9 montre les indices retenus et permet de vérifier l'existence de liens en rapport avec les caractéristiques des stations. Ces indices varient de très élevé à très faible et s'inspirent des travaux de GRONDIN *et al.* (1993). Ils sont définis à partir des indices synthèses de qualité de station déjà présentés au tableau 8. Mis à part les résultats obtenus à partir d'un nombre d'observations inférieur 10 – identifiés par deux astérisques (**) au tableau 9 – lesquelles produisent une certaine hétérogénéité dans quelques types écologiques, il est possible d'attribuer un indice synthèse pour chacun des types écologiques (Tableau 9).

En regard de cet indice, on observe une hiérarchie entre les types écologiques. Les stations mésiques des érablières à Bouleau jaune et des sapinières à Bouleau jaune (FE31, FE32, MS12, MS13) présentent un indice synthèse très élevé. Les stations mésiques des sapinières à Épinette rouge et des sapinières à Thuya montrent des indices de croissance modérés à élevés selon les essences retenues. En effet, seules les Épinettes noire et rouge du type écologique de la sapinière à Épinette rouge mésique (RS42) ont un indice élevé dans ce groupe. Le type écologique de la sapinière à Thuya hydrique (RS22) a un indice faible et la station très mal drainée de la cédrière à Sapin (RC22) présente un indice très faible. Ces résultats démontrent bien l'importance des facteurs écologiques sur le potentiel de croissance des stations. La hiérarchie observée est comparable à celle obtenue par SAUCIER (1992, 1993), GRONDIN *et al.* (1993), BÉLANGER *et al.* (1995) et TREMBLAY (1996) pour les stations aux caractéristiques écologiques semblables.

### 2.5 Utilisation possible des résultats

Malgré le classement des stations à l'aide d'indices de croissance synthèses, les $IQS_{pot}$ obtenus montrent des différences de croissance selon les espèces pour un même type écologique, tout comme l'ont observé GRONDIN *et al.* (1993), SAUCIER (1992) et ZELAZNY *et al.* (1989). Ces résultats démontrent l'importance d'évaluer le potentiel de chaque espèce lorsque l'on veut modéliser la croissance d'un peuplement. De plus, la connaissance du potentiel de croissance de chaque espèce sur une même station est un élément utile au choix des essences que l'on désire favoriser au moment de la planification des interventions sylvicoles.




* La lettre indique l'origine de la courbe : K = Ker et Bowling et les lettres A à E réfèrent aux groupes présentés au tableau 8. Les chiffres suivant le tiret (-) représentent l'IQS.

**Figure 8**

Comparaison des courbes hauteur-âge synthèses à celles de KER et BOWLING (1991).

## Tableau 9

Synthèse des résultats

| Principales caractéristiques écologiques des stations étudiées | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Type écologique (code)[a] | | (RS11) | (FE31) | | | | | | |
| Végétation potentielle | | sapinière à Épinette rouge (Thuya) xérique | érablière à Bouleau jaune mésique | sapinière à Bouleau jaune mésique | sapinière à Bouleau jaune subhydrique | sapinière à Thuya hydrique | cédrière à Sapin sur tourbe minérotrophe | sapinière à Épinette rouge hydrique | sapinière à Épinette rouge mésique |
| Dépôt (code)[b] | | Minéral mince ou roc (M1A, RIA, R) | Minéral épais (1A, 1AY) | Minéral épais (1A, 1AY, 1AM) | Minéral épais (1A, 1AY) | Minéral épais (1A, 1AY) | Organique (7T, 7E) | Minéral épais (1A, 1AD, 2BE, 3AN) | Minéral épais (1A, 1AD, 2BE, 3AN) |
| Drainage (classe)[c] | | Xérique (10) | Mésique (20,30) | Mésique (20,30) | Hydrique (31,41) | Hydrique (41,51) | Hydrique (61) | Hydrique (40,50) | Mésique (20,30) |
| Groupe écologique[d] | | PLS-VAA | ERP | ERE | ERE-RUP | ERE-RUP | ERE-RUP-AUR | PLS-VAA-SPS | PLS-VAA |
| Indices de croissance synthèses et $IQS_{pot}$ ( )[a] | | | | | | | | | |
| Essence[g] | EPB | E (17,2)** | TE (19,8)** – | TE (19,8) | TE (19,8) | F (13,4)** | F (13,4)** | E (16,8)** | TE (19,8)** |
| | EPX | – M (14,8) | – – | M (16,2)** | – | F (13,1) | TF (11,1) | M (14,8) | E (17,2) |
| | SAB | – (M (16,4)) | TE (19,2) (E (17,9)**) | TE (19,2) – | TE (19,2) | F (13,7) | TF (11,1) | M (16,4) | M (16,4) |
| Indice synthèse | | M | TE | TE | TE | F | TF | M | M à E |

[a] ( ) indique un type écologique rare possédant une répartition géographique particulière.

[b] Selon Robitaille (1988).

[c] Selon Saucier *et al.* (1994).

[d] Voir tableau 1 pour description des groupes.

[e] TE : très élevé; E : élevé; M : modéré; F : faible; TF : très faible; (-) : indique des données non disponibles;

[g] EPB : Épinette blanche; EPX : Épinettes noire et rouge; SAB : Sapin baumier, (**) indique que les résultats sont basés sur moins de dix observations.

Contrairement aux études traditionnelles, où la hauteur est prédite en fonction de l'âge et de l'IQS, les courbes d'indices de station obtenues dans cette étude permettent de prédire la croissance en hauteur en fonction de l'âge à l'aide des variables écologiques. Ce remplacement de l'IQS par des variables écologiques repose sur l'hypothèse que les effets de ces variables peuvent être représentés adéquatement dans les modèles de croissance sans avoir à utiliser l'IQS (Wykoff et Monserud 1987). L'application la plus importante de cette méthode est de prédire la hauteur à n'importe quel âge en faisant appel aux facteurs de stations (Wang et Klinka 1995, Rondeux 1993). Cette application est particulièrement intéressante lorsque l'on veut prédire la croissance des peuplements en régénération pour lesquels aucune variable dendrométrique n'est mesurable.

D'autres utilisations sont également possibles lorsque le développement de ces modèles se fait à l'intérieur d'un cadre écologique. En effet, en plus de la classification écologique, la conception d'une cartographie écologique est essentielle pour susciter l'utilisation de l'information écologique de la part de l'aménagiste. La cartographie s'avère nécessaire puisque la planification de l'aménagiste se fait généralement sur un vaste territoire et il se doit de connaître les superficies de chacune des stations. À titre d'exemple, une des applications des plus intéressantes pour l'aménagiste, conjugue la classification des écosystèmes, les études de croissance et la cartographie au regroupement des strates cartographiques. En effet, au Québec la prédiction des volumes de bois est basée sur les regroupements de strates forestières qui ont été préalablement cartographiées. Dans l'objectif de prédire la croissance de ces strates, l'aménagiste doit évaluer l'IQS afin de choisir la table de production la plus adéquate. En procédant au regroupement des strates selon les caractéristiques écologiques des stations et leur potentiel de croissance, le travail est non seulement simplifié mais le niveau de confiance des résultats s'améliore. Cette approche permet la formation de stations forestières selon un cadre phytosociologique exprimant la composition floristique et la dynamique temporelle des forêts et d'un cadre dendrométrique qui caractérise, par des valeurs statistiques, la production forestière telle que proposée dans la Stratégie de protection des forêts du Québec (MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES 1994).

# Conclusion

Cette étude décrit une méthode pour évaluer et comparer le potentiel de croissance en fonction des types écologiques pour les principales espèces du sous-domaine de l'Est de la sapinière à Bouleau jaune. La méthode utilisée fait appel à la relation hauteur-âge et les comparaisons des courbes, exprimant cette relation, démontrent qu'il existe des différences significatives du potentiel de croissance entre les types écologiques. Le potentiel de croissance a été déterminé à l'aide d'analyses de tiges qui permettent ainsi la correction des périodes d'oppression dans la phase juvénile et également la correction des retards de croissance occasionnés par les épidémies de Tordeuse des bourgeons de l'Épinette. L'âge corrigé permet d'estimer la croissance que l'on peut théoriquement espérer pour une station donnée. Ce potentiel ne pourra être atteint que si l'on pratique des interventions sylvicoles pour réduire au maximum les pertes de croissance des arbres causées par des facteurs externes indépendants de la qualité de la station. Les $IQS_{pot}$ obtenus doivent être envisagés comme un objectif à atteindre et non pas comme le reflet de la croissance de la forêt naturelle.

Les comparaisons des courbes hauteur-âge ont permis de former des groupes au potentiel de croissance semblable et de leur attribuer à la fois un indice de qualité de station selon l'essence et un indice synthèse de croissance. Ces groupes permettent de mieux définir le concept de la station forestière en précisant leur potentiel de croissance. Le regroupement basé uniquement sur le potentiel de croissance démontre que le niveau de détail du type écologique est trop élevé puisque certains types écologiques possèdent une croissance similaire. Cependant, cette observation ne remet pas en question l'utilisation du type écologique sur lequel repose la définition des stations forestières. Celui-ci peut être utilisé afin de caractériser la station forestière du point de vue des autres contraintes et potentiels pour la sylviculture. Afin d'améliorer la connaissance des stations forestières, il serait donc souhaitable, en plus des études sur la croissance de la forêt naturelle, d'entreprendre des études sur la dynamique temporelle, les contraintes d'aménagement et la réaction des peuplements à la suite de traitements sylvicoles selon les stations.

# Références bibliographiques


ASSMAN, E., 1970. *The Principle of Forest Yield Study.* Pergamon Press, New York. 506 p.

BÉGIN, J., 1996. *Anatige.* Programme de compilation des données du logiciel Windendro. Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec.

BÉLANGER, L., 1985. *Intégration de l'information écologique dans la gestion des terres de l'écoumène forestier par l'inventaire écologique des terres.* Thèse de doctorat, Faculté de foresterie et géodésie, Université Laval, Québec. 602 p.

BÉLANGER, L., S. PAQUETTE, S. MOREL, J. BÉGIN, P. MEEK, L. BERTRAND, P. BEAUCHESNE, S. LEMAY et M. PINEAU, 1995. *Indices de qualité de station du Sapin baumier dans le sous-domaine écologique de la sapinière à Bouleau blanc humide.* For. Chron. 71 : 317-325.

BERGERON, Y., A. BOUCHARD, P. GANGLOFF et C. CAMIRÉ, 1983. *La classification écologique des milieux forestiers de la partie ouest des cantons d'Hébercourt et de Roquemaure, Abitibi, Québec.* Études Écologiques nº 9. Lab. d'écologie forestière, Université Laval, Québec. 169 p.

BLAIS, J.R. et R. MARTINEAU, 1960. *A Recent Spruce Budworm Outbreak in The Lower St. Lawrence and Gaspé Peninsula with Reference to Aerial Spraying Operations.* For. Chron. 36 : 209-224.

BLAIS, J.R., 1961. *Spruce Budworm Outbeaks in The Lower St. Lawrence and Gaspé Regions.* For. Chron. 37 : 192-202.

BLAIS, J.R. 1983. *Trends in The Frequency, Extent and Severity of Spruce Budworm Outbreak in Eastern Canada.* Can. J. For. Res. 13 : 539-547.

BLOUIN, J.-L. et M.M. GRANDTNER, 1971. *Étude écologique et cartographie de la végétation du comté de Rivière-du-Loup.* Service de la recherche, ministère des Terres et Forêts, Québec. Mémoire n° 6. 371 p.

BORDELEAU, C., D. GUÉRIN, L. INNES, D. LACHANCE et R. PICHER, 1989. *Insectes et maladies des arbres-Québec 1988.* Forêt Conservation 57(1) : 3-6.

BORDELEAU, C., D. GUÉRIN, L. INNES et D. LACHANCE, 1990. *Insectes et maladies des arbres – Québec 1989.* Forêt Conservation 56(1) : 3-5.

BORDELEAU, C. et M. AUGER, 1991. *Insectes et maladies des arbres – Québec-1990.* Gouv. du Québec, min. des Forêts. 3-5.

BORDELEAU, C. et M. AUGER, 1992. *Insectes et maladies des arbres – Québec-1991.* Gouv. du Québec, min. des Forêts. 3-5.

BORDELEAU, C., 1993. *Insectes et maladies des arbres – Québec–1992.* Gouv. du Québec, min. des Forêts. 3-5.

BOUDOUX, M., 1978. *Tables de rendement empiriques pour l'Épinette noire, le Sapin baumier et le Pin gris au Québec.* Ministère des Terres et Forêts, Gouvernement du Québec, Québec. 101 p.

BURNS, R.M. et B.H. HONKALA, 1990. *Silvics of North America,* volume 1, Conifers. USDA, Forest Service, Washington, DC. 675 p.

CARMEAN, W.H., 1975. *Forest Site Quality Evaluation in The United States.* Adv. Agron. 27 : 209-269.

CARMEAN, W.H. et D.J. LENTHALL, 1989. *Height-Growth and Site Index Curves for Jack Pine in North Central Ontario.* Can. J. For. Res. 19 : 215-224.

CONSEIL DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE DU QUÉBEC, 1995. *Le secteur forestier québécois face à ses défis : des orientations de recherche et de développement.* Conseil de la recherche forestière du Québec, Québec. 47 p.

DAVIS, L.S. et K.N. JOHNSON, 1987. *Forest Management.* Third edition, McGraw-Hill Editor, New York. 790 p.

DECOURT, N., 1973. *Production primaire, production utile : méthode d'évaluation, indices de productivité.* Ann. Sci. For. 30(3) : 219-238.

DYER, M.E. et R.L. BAILEY, 1987. *A Test of Six Methods for Estimating True Heights from Stem Analysis Data.* For. Sci. 33 : 3-13.

GAGNON, R., 1985. *Croissance du Sapin baumier en relation avec la durée de sa période initiale d'oppression.* Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec. 54 p.

GERARDIN, V., 1977. *An Integrated Approach in The Determination of Ecological Groups in Vegetation Studies.* Thèse de doctorat, Univ. of Connecticut, USA. 237 p.

GERARDIN, V., 1980. *L'inventaire du Capital-Nature du territoire de la Baie-James.* Les régions écologiques et la végétation des sols minéraux, tome 1. Méthodologie et description, 398 p. et tome 2, annexes, Serv. études écologiques régionales, min. Environ., Québec.

GRONDIN P., J. LAROCHE, P. TARDIF et J.P. SAUCIER. 1993. *Utilisation des modèles de croissance dans la définition des stations forestières.* Les modèles de croissance et leurs utilisations, Ung. C.H. éd. Service canadien des forêts, Québec. 204-218.

GRONDIN, P., J. NOËL, et S. BÉDARD, 1995a. *Classification écologique préliminaire du sous-domaine de l'Est de la sapinière à Bouleau jaune.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. 61 p.

GRONDIN, P., S. BÉDARD. et P. DORAIS., 1995b. *Classification écologique abrégée du sous-domaine de l'Est de la sapinière à Bouleau jaune.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. 31 p.

HART, A.C., 1965. *Red Spruce (*Picea rubens *Sarg.). Dans* : Silvics of Forest Trees of The United States. H.A. Fowells, comp. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 271. Washington, DC, 305-310

HEGER, L., 1968. *A Method of Constructing Site Index Curves from Stem Analyses.* Forestry Chronicle 44(4) : 11-15.

HILLS, M.O., 1979b. *Twinspan.* A Fortran Program for Arranging Multivariates Data in an Ordered Two-Way Table by Classification of the Individuals and Attributes. Cornell University Ithaca, N.Y., 90 p.

KER, M.F. et C. BOWLING, 1991. *Polymorphic Site Index Equations for Four New Brunswick Softwood Species.* Can. J. For. Res. 21 : 728-732.

LACHANCE, D., C. MONNIER, J.-P. BÉRUBÉ et R. PAQUET, 1990. *Insectes et maladies des forêts dans la région du Bas-Saint-Laurent–Gaspésie de 1936 à 1987.* Forêt Canada, Région du Québec. Rapport d'information LAU-X-93. 223 p.

LAPOINTE, C., 1995. *Tests statistiques pour la comparaison de courbes d'analyse de données indépendantes et de mesures répétées.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne. 8 p.

LAROCQUE, G., W.J. PARTON et D.J. ARCHIBALD, 1996. *Fonctions polymorphes de productivité de site pour l'Épinette noire selon divers types écologiques.* Serv. Can. For., CFL, Rap. Inf. LAU-X-119F, 17 p.

LINDSTROM, M.J. et D.M. BATES, 1990. *Nonlinear Mixed Effects Models for Repeated Measures Data.* Biometrics 46 : 673-687.

LITTEL, R.C., G.A. MILLIKEN, W.W. STROUP et R.D. WOLFINGER, 1996. *SAS System for Mixed Models.* SAS Institute Inc., Cary, NC. 633 p.

LORTIE, M., 1979. *Arbres, forêts et perturbations naturelles au Québec.* Les presses de l'Université Laval, Québec. 172 p.

MACLEAN, D.A. 1985. *Effects of Spruce Budworm Outbreaks on Forest Growth and Yield. Dans* : Recent Advances in Spruce Budworm Research. Proceedings of the CANUSA Spruce Budworm Research Symposium, 16-20 Septembre, 1984, Bangor, Maine. Éditeurs : Sanders, C.J., R.W. Stark, E.J. Mullins et J. Murphy. Service canadien des forêts, Ottawa, Ont. 148-175.

MONSERUD, R.A., 1984. *Height Growth and Site Index Curves for Inland Douglas Fir Based on Stem Analysis Data and Forest Habitat Type.* For. Sci. 30 : 943-965.

MONSERUD, R.A., 1987. *Variation on a Theme of Site index.* IUFRO Forest Growth Modeling and Prediction Conference, Editors : Ek, A.R., S.R. Shiffley et T.E. Burk, USDA, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Minneapolis, Minnesota. 419-427.

MORRIS, R.F., 1948. *How Old is a Balsam Fir ?* For. Chron. 24 : 106-110.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1994. *Une stratégie : Aménager pour mieux protéger les forêts.* Ministère des Ressources naturelles du Québec, Québec. 197 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1996b. *Programme de connaissance des écosystèmes forestiers du Québec méridional : objectifs et méthodes de classification de la végétation.* Direction de la gestion des stocks forestiers, ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, Québec. 11 p.

NETER, J. et W. WASSERMAN, 1974. *Applied Linear Statistical Models.* Regression, Analysis of Variance and Experimental Designs. Irwin ed., Homewood, Illinois. 842 p.

PAGE, G., 1976. *Quantitative Evaluation of Site Potential for Spruce and Fir in Newfoundland.* For. Sci. 22 : 131-143.

RICHARDS, F.J., 1959. *A Flexible Growth Function for Empirical Use.* J. Exp. Bot. 10 : 290-300.

RIOPEL, M., 1999. *Potentiel de croissance de la haute régénération préétablie de Sapin baumier : une analyse dendrométrique au niveau de la tige et du peuplement.* Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec. 149 p.

ROBITAILLE, A. et M. ALLARD, 1996. *Guide pratique d'identification des dépôts de surface au Québec.* Les publications du Québec, Québec. 109 p.

RONDEUX, J., 1993. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers.* Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique. 521 p.

SAS INSTITUTE INC., 1988. *SAS/STAT User's Guide,* Release 6.03 Edition. Cary, NC. 1 028 p.

SAUCIER, J.-P., 1991. *Estimation de l'indice de qualité de station en fonction des types écologiques de la région 5a, Basses et Moyennes Appalaches.* Rapport préliminaire. Non publié. 7 p.

SAUCIER, J.-P., 1992. *Croissance et rendement en fonction des types écologiques photointerprétés de la région écologique 5a, Basses et Moyennes Appalaches.* Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec. 189 p.

SAUCIER, J.-P., 1993. *Proposition d'unités homogènes en vue d'établir des tables de rendement : les stations forestières.* Les modèles de croissance et leurs utilisations, Ung, C.H. éd., Service canadien des forêts, Québec. 192-203.

SAUCIER, J.-P., J.-P. BERGER H. D'AVIGNON et P. RACINE, 1994. *Le point d'observation écologique.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la gestion des stocks forestiers, Service des inventaires forestiers. 116 p.

SAUCIER, J.-P. et A. ROBITAILLE, 1995. *Les unités et les aires écophysiographiques* (version préliminaire). Ministère des Ressources naturelles, Direction de la gestion des stocks forestiers.

SAUCIER, J.-P. et P. GRONDIN, 1996. *Chapitre 3. Écologie forestière, section 2D. Domaine de la sapinière à Bouleau jaune.* Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses du l'Université Laval, Québec. 197-208.

SAUCIER, J.-P., J.-F. BERGERON, P. GRONDIN et A. ROBITAILLE, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional (3e version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec.* Supplément de l'Aubelle, n° 124. 12 p.

SCHMIDT, M.G. et W.H. CARMEAN, 1988. *Jack pine Site Quality in Relation to Soil and Topography on North Central Ontario.* Can. J. For. Res. 18 : 297-305.

SPURR, S.H. et B.V. BARNES, 1980. *Forest Ecology.* 3e édition, John Wiley & Sons, New York. 571 p.

THIBAULT, M., 1985. *Les régions écologiques du Québec méridional : Deuxième approximation.* Service de la cartographie et Service de la recherche, MER. Carte 1 : 1 250 000.

TREMBLAY, S., 1996. *Productivité de Sapinières boréales de seconde venue en relation avec les caractéristiques stationnelles.* Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec. 139 p.

WANG, G.G. et K. KLIKA, 1995. *Site-Specifique Height Curves for White Spruce [Picea glauca (Moench) Voss] Stands Based on Stem Analysis and Site Classification.* Ann. Sci. For. 52 : 607-616.

WYKOFF, W.R. et R.A. MONSERUD, 1987. *Presenting Site Quality in Increment Models : a Comparison of methods. Dans* : Forest Growth Modeling and Prediction. Vol. 1, USDA For. Serv., North Central For. Exp. Stn, Saint Paul, MN. Gen. Tech. Rep. NC-120, 184-191.

VICARY, B.P., T.B. BRANN et R.H. GRIFFIN, 1984. *Base-Age Invariant Polymorphic Site Index Curves for Even-Aged Spruce-fir Stands in Maine.* Experiment Station Bulletin 802, Maine Agricultural Experiment Station, University of Maine, Orono, Maine. 33 p.

VONESH, E.F. et R.L. CARTER, 1992. *Mixed Effects Nonlinear Regression for Unbalanced Repeated Measures.* Biometrics 48 : 1-17.

ZARNOVICAN, R., 1981. *À propos de l'âge du Sapin baumier et de sa détermination.* Journal canadien de la recherche forestière 11(4) : 805-811.

ZARNOVICAN, R., 1992. *Croissance en hauteur de l'Épinette noire : région de Lebel-sur-Quévillon et de Dolbeau au Québec.* Can. J. For. Res. 22 : 1378-1386.

ZARNOVICAN, R., D. OUELLETTE et S. GENDRON, 1992. *Manuel d'utilisation et références techniques, Logiciel pour analyse de tiges, version 1.0.* Forêt Canada. 11 p.

ZARNOVICAN, R., 1983. *Production stationnelle dans les sapinières en Gaspésie.* Service canadien des forêts, Centre de recherches forestières des Laurentides. Rapports d'information LAU-X-64, 47 p.

ZEIDE, B., 1993. *Analysis of Growth Equations.* For. Sci. 39(3) : 594-616.

ZELAZNY, V.F., T. NG, M.G. HAYNER, C.L. BOWLING et D.A. BEWICK. 1989. *Field Guide to Forest Site Classification in New Brunswick.* Department of Natural Resources and Energy, Timber Management Branch, Fredericton. 43 p.

# Annexe A

## Description des codes des dépôts de surface utilisés

| | |
|---|---|
| R | Dépôt très mince ou absent |
| R1A | Till indifférencié de mince à très mince (< 50 cm) |
| M1A | Till indifférencié très mince (< 25 cm) |
| 1AM | Till indifférencié mince (25 à 50 cm) |
| 1AY | Till indifférencié mince d'épaisseur moyenne (50 cm à 1 m) |
| 1A | Till indifférencié épais (> 1m) |
| 1AD | Till délavé |
| 2BE | Dépôt d'épandage |
| 3AN | Dépôt fluviatile ancien |
| $7^{E}$ | Dépôt organique épais (> 1 m) |
| 7T | Dépôt organique mince (< 1 m) |

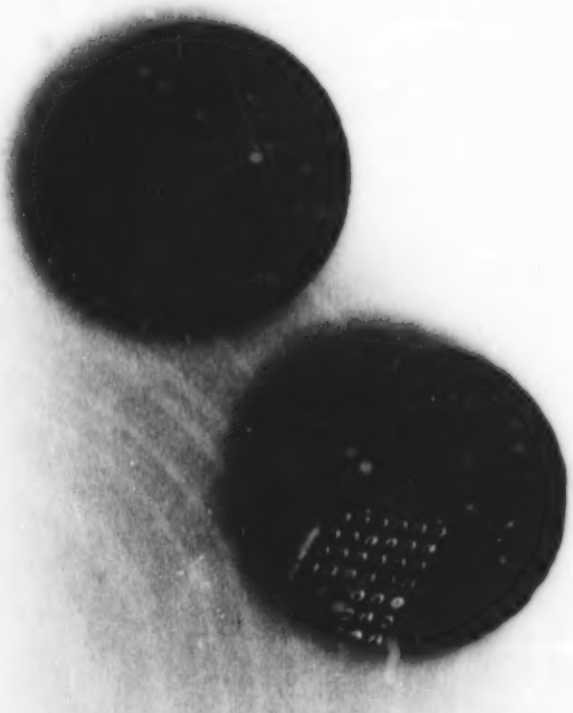
# Annexe B

## Classes de drainage utilisées

| [illegible] | [illegible] |
|---|---|
| 0 | Drainage excessif |
| 1 | Drainage rapide |
| 2 | Drainage bon |
| 3 | Drainage modéré |
| 4 | Drainage imparfait |
| 5 | Mauvais drainage |
| 6 | Drainage très mauvais |

Direction de la recherche forestière
Forêt Québec
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418.643.7994
Télécopieur : 418.643.2165
Site Web : http://www.mrn.gouv.qc.ca/drf
Courriel : rech.for@mrn.gouv.qc.ca

Les aménagistes forestiers doivent être en mesure de prédire la croissance et la productivité des peuplements, y compris ceux en régénération après une coupe. L'évaluation du potentiel de croissance des peuplements selon l'essence et les caractéristiques des stations afférentes permet notamment de définir les objectifs de production lors de l'élaboration des plans d'aménagement forestier et aussi de calculer la possibilité annuelle de coupe. C'est dans ce but que la Direction de la recherche forestière subventionne certains travaux de recherche portant sur ces aspects de la connaissance de la forêt.



Ressources naturelles Québec

ISBN 2-550-38688-4
F.D.C. 568 (047.3) (714)
L.C. SD 387.553
2002-3025